



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO**

CINÉTICA DE DEGRADACIÓN QUÍMICA DE RESIDUOS DE POLIETILENO DE  
BAJA DENSIDAD (PEBD) POR DISOLUCIÓN EN ACEITE ESENCIAL DE

*Eucalyptus globulus*

**Línea de investigación:**

**Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación**

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

**Autor:**

Vignati Dueñas, René

**Asesor:**

Iannacone Oliver, José Alberto

ORCID: 0000-0003-3699-4732

**Jurado:**

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Castañeda Pérez, Luz Genara

Zamora Talaverano, Noe Sabino

**Lima - Perú**

**2024**

## Reporte de Análisis de Similitud

Archivo:

[1A VIGNATI DUEÑAS RENE DOCTORADO 2023.docx](#)

Fecha del Análisis:

6/03/2023

Analizado por:

Astete Llerena, Johnny Tomas

Correo del analista:

[jastete@unfv.edu.pe](mailto:jastete@unfv.edu.pe)

Porcentaje:

6 %

Título:

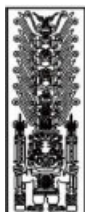
CINÉTICA DE DEGRADACIÓN QUÍMICA DE RESIDUOS DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD) POR DISOLUCIÓN EN ACEITE ESENCIAL DE *Eucalyptus globulus*

Enlace:

<https://secure.arkund.com/old/view/152975601-461468-233152#q1bKLvayijbQMdQxitVRKs5Mz8tMyOxOzEtOVbly0DMwNbE0Nze2sDCzMDI3MbUwrgUA>



DRA. MIRIAM LILIANA FLORES CORONADO  
JEFA DE GRADOS Y GESTIÓN DEL EGRESADO



## ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSTGRADO

### CINÉTICA DE DEGRADACIÓN QUÍMICA DE RESIDUOS DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD) POR DISOLUCIÓN EN ACEITE ESENCIAL DE *Eucalyptus globulus*

Línea de investigación:  
Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el grado académico de  
Doctor en Ingeniería Ambiental

**Autor:**

Vignati Dueñas, René

**Asesor:**

Iannacone Oliver, José Alberto

ORCID: 0000-0003-3699-4732

**Jurado:**

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Castañeda Pérez Luz Genara

Zamora Talaverano Noe Sabino

**Lima – Perú**

**2024**

## **DEDICATORIA**

*A la Madre Tierra por todos los regalos  
brindados a lo largo de mi vida y a los hombres  
y mujeres de este planeta que trabajan día a  
día para proteger nuestro medio ambiente.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A mis hijos y familia por ser la inspiración para concretar uno de mis mejores sueños.*

*A mi asesor Dr. José Alberto Iannacone Oliver por sus consejos, y orientación para realizar exitosamente mi tesis.*

*A mis Docentes del Doctorado en Ingeniería Ambiental por demostrarme su calidad profesional y humana, los mismos que enriquecieron con sus comentarios y aportes que haciendo posible la culminación de este trabajo de investigación: “Cinética de degradación química de residuos de polietileno de baja densidad (PEBD) por disolución en aceite esencial de Eucalyptus globulus*

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	9
ABSTRACT.....	10
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1. Planteamiento del problema.....	11
1.2. Descripción del problema .....	12
1.3. Formulación del problema .....	13
1.3.1. Problema general.....	13
1.3.2. Problemas específicos .....	13
1.4. Antecedentes .....	13
1.4.1. Antecedentes internacionales .....	13
1.4.2. Antecedentes nacionales .....	19
1.5. Justificación de la investigación .....	22
1.6. Limitaciones de la investigación.....	23
1.7. Objetivos.....	23
1.7.1. Objetivo general .....	23
1.7.2. Objetivos específicos.....	23
1.8. Hipótesis .....	23
1.8.1. Hipótesis general .....	23
1.8.2. Hipótesis específicas .....	24
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
2.1. Marco conceptual.....	25
2.1.1. Aceite esencial.....	25
2.1.2. Composición del aceite esencial de eucalipto .....	25
2.1.3. Polietileno de baja densidad (PEBD).....	28
2.1.4. Cinética de degradación .....	28
2.1.5. Propiedades mecánicas de polímeros.....	29

2.1.6. Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier.....	30
<b>III. MÉTODO .....</b>	<b>31</b>
3.1. Tipo de Investigación.....	31
3.2. Población y muestra.....	31
3.3. Operacionalización de variables .....	31
3.4. Instrumentos.....	32
3.4.1. Espectrofotómetro IR con transformada de Fourier.....	32
3.4.2. TA-HD plus c.texture Analyzer.....	32
3.4.3. Balanza de precisión.....	32
3.5. Procedimiento .....	32
3.5.1. Degradación del PEDB con aceite esencial de eucalipto para la determinación de la cinética.....	32
3.5.2. Disolución del PEDB para las pruebas de espectroscopia infrarroja. ....	33
3.5.3. Pruebas de degradación mecánica.....	34
3.5.4. Prueba de hipótesis para las propiedades mecánicas del PEDB .....	34
3.6. Análisis de datos.....	34
3.6.1. Diseño completamente al azar.....	34
3.6.2. Análisis de varianza .....	35
3.6.3. Análisis de regresión .....	35
<b>IV. RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
4.1. Resultados.....	36
4.1.1. Tratamiento de las muestras en gasolina a temperatura ambiente .....	36
4.1.2. Tratamiento de las muestras con aceite esencial de eucalipto al 10% en volumen a temperatura ambiente .....	37
4.1.3. Resultados del tratamiento de datos de la degradación del PEDB tratadas con gasolina y aceite esencial de eucalipto en etanol .....	38
4.1.4. Tratamiento de las muestras tratadas con gasolina a 40 °C.....	40
4.1.5. Tratamiento de las muestras tratadas con una solución al 10% en volumen con alcohol etílico a 40 °C .....	43
4.2. Cálculo de los parámetros cinéticos.....	45

4.3.	Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con gasolina a temperatura ambiente...45
4.3.1.	Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con eucalipto a temperatura ambiente. ....46
4.3.2.	Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con gasolina a 40 °C .....47
4.3.3.	Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con solución de aceite esencial de eucalipto a 40 °C.....47
4.4.	Cinética de las propiedades mecánicas .....47
<b>V.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....60
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....64
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....65
<b>VIII.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....66
<b>IX.</b>	<b>ANEXOS</b> .....74
	Anexo A: Testimonio fotográfico .....74
	Anexo B: Muestras estudiadas.....78
	Anexo C: Lecturas FTIR de Aceite esencial.....79
	Anexo D: Lecturas FTIR de residuos de PEBD .....80
	Anexo E: Matriz de consistencia .....81

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Composición química del aceite esencial de eucalipto .....	26
<b>Tabla 2:</b> Operacionalización de variables .....	31
<b>Tabla 3:</b> Diseño completo al azar .....	35
<b>Tabla 4:</b> Análisis de varianza para un diseño completo al azar .....	35
<b>Tabla 5:</b> Reporte de la variación de los pesos en función del tiempo en solución de gasolina .....	36
<b>Tabla 6:</b> Reporte de la variación de los pesos en función del tiempo en solución alcohólica de aceite esencial de eucalipto .....	37
<b>Tabla 7:</b> Reporte de la disolución del PEBD en gasolina de 95 octanos.....	41
<b>Tabla 8:</b> Reporte de los pesos obtenidos mediante tratamiento del PEBD con solución de aceite esencial.....	43
<b>Tabla 9:</b> Propiedades mecánicas del polietileno tratado durante 10 horas.....	48
<b>Tabla 10:</b> Análisis de varianza para el parámetro “Strength” .....	49
<b>Tabla 11:</b> Análisis de varianza para el parámetro “Breaking strain” .....	51
<b>Tabla 12:</b> Análisis de varianza para el parámetro “Toughness” .....	53
<b>Tabla 13:</b> Parámetros cinéticos de la degradación del PET con gasolina .....	63
<b>Tabla 14:</b> Parámetros cinéticos de la degradación del PET con aceite esencial de eucalipto al 10% de etanol.....	63

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Gráfico tensión-deformación de un polímero .....	<b>29</b>
<b>Figura 2:</b> Proceso de disolución de las muestras de polietileno de baja densidad en gasolina y solución de aceite esencial de eucalipto en alcohol etílico .....	<b>38</b>
<b>Figura 3:</b> Cambio de peso de las muestras tratadas con gasolina en función del tiempo .....	<b>38</b>
<b>Figura 4:</b> Peso promedio de las muestras de PEBD función al tiempo de exposición .....	<b>39</b>
<b>Figura 5:</b> Variación de pesos de PEBD en función al tiempo para cada muestra medida por triplicado .....	<b>39</b>
<b>Figura 6:</b> Valor promedio de la variación de los pesos en función al tiempo .....	<b>40</b>
<b>Figura 7:</b> Muestras tratadas con aceite esencial de eucalipto (izquierda) y muestras tratadas con gasolina (derecha) .....	<b>40</b>
<b>Figura 8:</b> Tratamiento de las muestras en gasolina a 40 °C .....	<b>41</b>
<b>Figura 9:</b> Variación del peso del PEBD tratada con gasolina de 95 octanos .....	<b>42</b>
<b>Figura 10:</b> Variación del peso en función del tiempo para la muestra tratada con gasolina de 95 octanos .....	<b>42</b>
<b>Figura 11:</b> Resultado gráfico de los datos reportados de las muestras tratadas con solución de aceite esencial al 10% en alcohol etílico.....	<b>44</b>
<b>Figura 12:</b> Representación gráfica de la masa promedio resultado del tratamiento con solución de aceite esencial de eucalipto al 10% en alcohol etílico .....	<b>44</b>
<b>Figura 13:</b> Muestras de PEBD tratadas y la solución de aceite esencial de eucalipto puro y aceite esencial de eucalipto al 10% en alcohol etílico (izquierda) y muestras tratadas con gasolina a 40 °C.....	<b>45</b>
<b>Figura 14:</b> Boxplot del parámetro “Strength” .....	<b>50</b>
<b>Figura 15:</b> Cinética del parámetro “Strength” .....	<b>50</b>
<b>Figura 16:</b> Boxplot del parámetro “Breaking strain” .....	<b>51</b>
<b>Figura 17:</b> Cinética del parámetro “Breaking strain” .....	<b>52</b>
<b>Figura 18:</b> Boxplot del parámetro “Toughness” .....	<b>53</b>
<b>Figura 19:</b> Cinética del parámetro “Toughness” .....	<b>53</b>
<b>Figura 20:</b> Comparación de stress (MPa) a diferentes tiempos .....	<b>55</b>
<b>Figura 21:</b> Comparación de espectros FTIR del PEBD a diferentes tiempos.....	<b>57</b>
<b>Figura 22:</b> Comparación de espectros FTIR del aceite esencial de eucalipto a diferentes tiempos.....	<b>59</b>

## RESUMEN

Se estudió la cinética de degradación del polietileno de baja densidad (PEBD) y las propiedades mecánicas, al ser sometidas a corrosión en una disolución de aceite esencial de eucalipto (AEEG). Las muestras de PEBD utilizadas fueron de 8.8 cm de ancho y 19 cm de longitud, las mismas que fueron expuestas por 7 horas y los pesos de las muestras fueron tomadas cada hora. Adicionalmente, muestras similares fueron sometidas a tratamientos con gasolina de 95 octanos con la finalidad de hacer una comparación con el tratamiento realizado con el AEEG. Los ensayos para determinación de la expresión de la Ley de velocidad se hicieron a las temperaturas de 19°C y 40°C. Se determinó que el valor del orden de reacción entre el PEBD y AEEG a 19°C es  $n = 1$  y la constante es  $0.0062822h^{-1}cm^{-2}$  y a 40°C,  $n = 1$  y la constante es igual a  $0.0073502h^{-1}cm^{-2}$ . También, se estudió la cinética de la degradación de las propiedades mecánicas se observó una tendencia a la disminución de la resistencia (“Strength”) del PEBD con el tiempo de tratamiento. Sin embargo, hubo una alta dispersión de datos a lo largo del estudio, lo que hizo que la correlación no fuera sólida, se encontró una correlación inversa significativa entre el tiempo de tratamiento y la elongación en la rotura (“Breaking strain”) del PEBD. A medida que aumentaba el tiempo de tratamiento, esta propiedad disminuyó y la tenacidad (“Toughnes”) del PEBD mostró una fuerte tendencia a disminuir con el tiempo de tratamiento, y esta relación fue respaldada por un alto coeficiente de determinación. Así se concluye que la degradación química del PEBD tiene influencia en las propiedades mecánicas y corresponde a un modelo cuadrático, además, observando que la temperatura no tiene influencia en el orden de reacción, en cambio, el tiempo si tiene influencia directa en la cantidad de PEBD disuelta en el aceite y es proporcional al área de contacto.

*Palabras clave:* Eucaliptol, disolución, degradación de plásticos, resistencia a la tracción, alargamiento a la ruptura, capacidad de un material.

## ABSTRACT

The degradation kinetics of low-density polyethylene (LDPE) and the mechanical properties were studied when subjected to corrosion in a solution of eucalyptus essential oil (AEEG). The LDPE samples used were 8.8 cm wide and 19 cm long, which were exposed for 7 hours and the samples were taken every hour. Additionally, similar samples were subjected to treatments with 95 octane gasoline to make a comparison with the treatment carried out with the AEEG. The tests to determine the expression of the Speed Law were carried out at temperatures of 19°C and 40°C. It was determined that the reaction value between the LDPE and AEEG at 19°C is  $n = 1$  and the constant is  $0.0062822h^{-1}cm^{-2}$  and at 40°C,  $n = 1$  and the constant is equal to  $0.0073502h^{-1}cm^{-2}$ . Also, the kinetics of the degradation of the mechanical properties was studied, and a tendency to decrease the resistance ("Strength") of the LDPE with treatment time was observed. However, there was a high dispersion of data throughout the study, which made the correlation not solid, a significant inverse correlation was found between treatment time and elongation at break ("Breaking strain") of the LDPE. As the treatment time increased, this property decreased and the toughness of the LDPE showed a strong tendency to decrease with treatment time, and this relationship was supported by a high coefficient of determination. Thus, it is concluded that the chemical degradation of the LDPE has an influence on the mechanical properties and corresponds to a quadratic model, in addition, observing that temperature has no influence on the reaction order, however, time does have a direct influence on the amount of LDPE dissolved in the oil and is proportional to the contact area.

*Keywords:* Eucalyptol, recycling, degradation of plastics, tensile strength, breaking strain, toughness.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

Ha habido muchos incidentes documentados del impacto del plástico en los ecosistemas y la vida silvestre. Las publicaciones revisadas por pares sobre impactos plásticos se remontan a la década de 1980. Una gran cantidad de desechos plásticos se han vertido al medio ambiente en todo el mundo, lo que provoca el problema actual de contaminación blanca. Los plásticos de desecho acumulados en el medio ambiente pueden degradarse aún más en pequeñas piezas como micro plásticos y nano plásticos a través de la intemperie, lo que causará más daño al medio ambiente y a los humanos que los plásticos grandes. Por lo tanto, es necesario considerar la producción y eliminación de plástico.

Algunos de los métodos utilizados para gestionar los residuos plásticos incluyen: vertedero, incineración, reciclaje químico y procesos mecánicos (Hamad *et al.*, 2013; Kan y Demirboğa, 2009; Thakur *et al.*, 2018). La desventaja del vertido es la no degradabilidad o la lenta tasa de degradación de los plásticos. Con la incineración, durante el proceso se producen emisiones tóxicas como dioxinas, furanos, mercurio y bifenilos policlorados (Wu *et al.*, 2014). El reciclaje mecánico permite la reutilización de los residuos sólidos plásticos para formar un nuevo producto con las mismas características inherentes (Garforth *et al.*, 2004; Gertsakis y Lewis, 2003; Hong y Chen, 2017). Por otro lado, los métodos que incluyen procesos de disolución se encuentran entre los propuestos como los más amigables y rentables con el medio ambiente (Zhao *et al.*, 2018).

Asimismo, los aceites naturales están compuestos principalmente por terpenos, sesquiterpenos y compuestos aromáticos. Los terpenos juegan un papel en los mecanismos de defensa de las plantas y atraen insectos para la polinización. Los terpenos poseen subunidades de isopreno; de los cuales se han identificado alrededor de 30 000 diferentes en raíces, rizomas,

tallos, hojas, flores, frutos y semillas para una variedad de plantas. Estos incluyen madera de coníferas, bálsamos, cítricos, cilantro, eucalipto, limoncillo, clavel, alcaravea, especies de menta y pimienta, romero, salvia y tomillo, entre otros. Los terpenos son la causa de los conocidos olores agradables, sabores especiados y propiedades farmacológicas que exhiben las plantas antes mencionadas (Baser y Buchbauer, 2009; Breitmaier, 2006; Stashenko, 2009; Wilbon *et al.*, 2013). El limoneno, el componente principal de los aceites esenciales que se encuentran en las frutas cítricas, es supuestamente el terpeno más investigado (Gutiérrez *et al.*, 2014). El limoneno disuelve las mismas cantidades de poliestireno expandido residual (WEP) que algunos disolventes orgánicos, pero tiene problemas de bajo rendimiento y alto costo de extracción. El uso de aceites naturales alternativos es una alternativa prometedora y respetuosa con el medio ambiente para reciclar plásticos para envases (Hattori *et al.*, 2008). Puede considerarse un proceso ecológico porque el CO<sub>2</sub> las emisiones se reducen en comparación con otros métodos y ofrece la oportunidad de reutilizar el material; aunque esta es todavía un área en desarrollo (Rosen, 2018; Vaccaro, 2017).

Esta preocupación, lleva a plantear interrogantes sobre qué hacer al respecto, y entonces fruto de una exhaustiva revisión de literatura se encontró un tratamiento “verde” de plásticos que permita reducir el impacto ambiental por su uso. Esta alternativa viene a ser el uso de aceites esenciales para la degradación de plásticos (PEBD), pues diversos trabajos han mostrado su efectividad (Gil-Jasso *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2018). Finalmente, siendo PEBD ampliamente usado para diversas actividades caseras y comerciales, es que se plantea este trabajo para evaluar la cinética de degradación con aceite esencial de eucalipto.

## **1.2. Descripción del problema**

El uso de polímeros existentes y ampliamente comercializados se convierten en un problema de eliminación debido al tiempo que tardan en descomponerse de forma natural y al impacto que tienen en el medio ambiente durante el proceso de degradación. Varias

metodologías y acciones se han propuesto para abordar este problema, que va desde el desarrollo de materiales biodegradables hasta métodos de reciclaje más sostenibles (Hong y Chen, 2017). En este trabajo de investigación, se pretende presentar un método simple para reciclar PEBD, utilizando aceite esencial de *Eucalyptus globulus*., el mismo que puede tener potenciales aplicaciones como solventes o aditivos de diferentes productos industriales, que aún no han sido investigados y prometen un gran nicho para la elaboración de nuevos trabajos.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cuál será la cinética de degradación química de residuos de polietileno de baja densidad (PEBD) por disolución en aceite esencial de *Eucalyptus globulus*?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cómo afecta el tiempo en la tasa de degradación del PEBD?
- b) ¿Cómo afecta la temperatura en las constantes cinéticas de la Ley de velocidad?
- c) ¿Cómo afecta la degradación química en las propiedades mecánicas del PEBD?

### **1.4. Antecedentes**

#### **1.4.1. Antecedentes internacionales**

Xiu *et al.* (2003) informó sobre un nuevo fenómeno de degradación del plástico de polipropileno por componentes volátiles de *Ledum palustre* (Esta especie de es parte de la familia Rhododendron). Describieron la característica de degradación mediante la resistencia a la tracción, el punto de fusión y las micrografías electrónicas de barrido, así como las micrografías ópticas. Analizaron la composición química del aceite volátil de *L. palustre* mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas. También discutieron el mecanismo de degradación y los problemas que deben resolverse.

La cantidad de residuos de poliestireno extruido (XPS) se ha incrementado en los últimos años debido al incremento de su uso en el aislamiento térmico de edificios, vehículos de transporte y frigoríficos, entre otros. La disolución con disolventes adecuados para lograr una reducción de volumen de más de 100 veces sin degradación de las cadenas de polímero es uno de los métodos más baratos y eficientes de reciclar XPS. Al respecto, García *et al.* (2009) han probado varios disolventes ecológicos como agentes de disolución para la reducción del volumen de XPS; la acción de estos disolventes no produce degradación alguna de las cadenas poliméricas. Investigaron la solubilidad del polímero en tales disolventes a diferentes temperaturas. El solvente se puede reciclar fácilmente por destilación, obteniendo un polímero reciclado de alta calidad.

La disolución con disolventes adecuados es uno de los procesos más baratos y eficientes para la gestión de residuos de poliestireno. trabajaron la solubilidad de las espumas de poliestireno en varios disolventes benceno, tolueno, xileno, tetrahidrofurano, cloroformo, 1,3-butanodiol, 2-butanol, linalol, geraniol, d-limoneno, p-cimeno, terpineno, felandreno, terpineol, mentol, eucaliptol, cinamaldheyde, nitrobenceno, N, N-dimetilformamida y agua. Los resultados experimentales han demostrado que para desarrollar un "proceso verde" los componentes de los aceites esenciales, d-limoneno, p-cimeno, terpineno, felandreno, son los disolventes más apropiados. La acción de estos solventes no produce degradación alguna de las cadenas poliméricas. También han investigado la solubilidad del polímero en los disolventes mencionados a diferentes temperaturas. El disolvente se puede reciclar fácilmente por destilación.

Mangalara y Varughese (2016) desarrollaron un proceso completamente verde que podría generar un producto reciclado y de valor agregado de poliestireno (PS), como partículas micro y nanométricas, a partir de residuos de PS expandido (EPS). El proceso utiliza el solvente

ecológico, d-limoneno para disolver el EPS de desecho. Mostraron la primera vez que se utiliza agua como no disolvente para la recuperación de partículas de PS micro y nanométricas mediante un método de emulsificación-difusión. El agua forma un azeótropo de bajo punto de ebullición con d-limoneno y reduce significativamente las temperaturas de funcionamiento. El poli (alcohol vinílico) (PVA), un polímero soluble en agua se utiliza para estabilizar la emulsión de aceite y agua y para controlar el tamaño de las partículas. Las partículas obtenidas se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido, FTIR y técnicas de dispersión dinámica de luz. Investigaron el efecto de las concentraciones de PS y PVA, la velocidad de agitación y la relación aceite / agua (o / p) sobre el rendimiento y el tamaño de partícula. El solvente usado fue recuperado mediante un proceso de destilación que se llevó a cabo junto con la emulsificación-difusión, haciendo el proceso más eficiente y sostenible.

La eliminación de poliestireno expandido contribuye al problema de contaminación actual. Para hacer frente a estos problemas, existen diferentes métodos de reciclaje. Sin embargo, la mayoría de estas opciones son caras y nocivas para el medio ambiente. Gil-Jasso *et al.* (2019) informaron sobre un proceso de reciclaje alternativo, ecológico y más económico para recuperar poliestireno expandido a temperatura ambiente basado en aceites esenciales comerciales usados sin purificación adicional. Lograron la disolución completa del poliestireno con una proporción máxima de 1: 1% en peso. Este tiempo de disolución es al menos cuatro veces más rápido que con limoneno. El poliestireno expandido residual puro (WEP) fue recuperado con metanol y finalmente fue secado. Todos los aceites esenciales fueron recuperados y usados nuevamente. Las materias primas: WEP, los aceites esenciales y el WEP recuperado se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja, difracción de rayos X en polvo y análisis termogravimétrico.

Zhang y Coello-Cedeño (2019) informaron sobre un fenómeno novedoso de degradación del plástico filme dado por los componentes volátiles (aroma), obtenidos de los jabones de Illari; específicamente de los aceites esenciales, con los que estos son elaborados. Caracterizaron la degradación mediante la resistencia a la tracción, el punto de fusión y las micrografías electrónicas de barrido, así como las micrografías ópticas. La composición química de las sustancias volátiles (aroma), presentes en los aceites esenciales, con los que se elaboran los jabones de Illari; se analizaron mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas.

Gil-Jasso et al. (2019) en su investigación realizada empleó aceites naturales como: estrella de anís, manzanilla, tomillo y eucalipto. Se realizaron ensayos de disolución en probetas, donde se sumergieron pequeños bloques de residuos de poliestireno expandido en los diferentes aceites naturales. Todos los aceites naturales lograron con éxito la disolución total de los residuos de poliestireno expandido a temperatura ambiente. La concentración máxima de disolución fue de 1 g de residuos de poliestireno expandido por gramo de aceite natural, que es una concentración más alta que la reportada para solventes orgánico. Los resultados muestran que el aceite de anís estrellado es el mejor solvente, siendo el más rápido en disolver los residuos de poliestireno expandido en las diferentes concentraciones probadas. Aunque la manzanilla fue más rápida que el eucalipto y el tomillo en concentraciones bajas, por encima del 45 % en peso, el eucalipto se volvió más rápido. Sin embargo, todos estos tiempos son más rápidos que el d-limoneno (800 s) al 10 % en peso.

Noguchi et al. (1998) en su investigación usó el limoneno (90% de pureza) extraído en Brasil se transporta a Japón en camiones cisterna y destilado al 95% de pureza en una planta química. La solución de poliestireno-limoneno es transportado a una planta de reciclaje, luego destilado y separado en gránulos de poliestireno y limoneno líquido. En el método de limoneno,

el proceso de destilación (separación de Poliestireno/limoneno) y el proceso de purificación de limoneno tienen emisiones de CO<sub>2</sub> relativamente más altas en todo el proceso. El proceso de recolección de poliestireno expandido provoca una menor emisión, ya que la reducción del volumen de poliestireno expandido por limoneno permite un transporte eficiente. El proceso de recolección de poliestireno expandido produce grandes cantidades de CO<sub>2</sub> en el método de contracción térmica porque se transporta un volumen tan grande de este. En cuanto al SO<sub>2</sub>, la emisión más alta proviene de la nueva producción de poliestireno y la más baja es del método de limoneno.

Li y Jiang (2002) en su investigación empleó el aceite esencial de las semillas de *C. cyminum* L. es un líquido amarillo claro con un rendimiento de 3,8% (v/p), presenta componentes identificados por GC y GC-MS (Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas) siendo estos 37 componentes, representando el 97,97% del aceite esencial. El aceite esencial de las semillas de *C. cyminum* L. está formado por un elevado número de sustancias oxigenadas Monoterpenos y derivados de sesquiterpenos. Los principales componentes identificados en esta fracción fueron cuminal (36,31%), alcohol cumínico (16,92%) y safranal (10,87%). Los compuestos oxigenados identificados contenían aproximadamente el 67% del aceite total. Los monoterpenos y sesquiterpenos estuvieron presentes en el aceite esencial en cantidades relativamente bajas, representando el 31,55 % del aceite total, que fueron principalmente  $\gamma$ -terpineno (11,14 %), pimeno (9,85 %) y  $\beta$ -pineno (7,75 %). La comparación de las composiciones químicas del aceite de comino chino con las de otros países reveló diferencias significativas. Una concentración relativamente alta de safranal (10,87 %) y 20 componentes traza, incluidos trans- $\beta$ -farneseno, germacreno D, pulegona, transpinocarveol, componentes principales del aceite de comino chino (cuminal, alcohol cumínico,  $\gamma$ -terpineno, p-cimeno y  $\beta$ -pineno) se han encontrado previamente en los aceites de comino obtenidos de Turquía, Pakistán, India, Argentina, Cuba, Egipto e Irán.

Arias y Vásquez (2018) en la investigación demostraron que la degradación y biodegradación de los plásticos en el medio ambiente están relacionados con la estructura química del material y los factores ambientales, en este estudio, la degradación estuvo influenciada por factores abióticos, como la temperatura, la radiación UV, la salinidad, la turbulencia y la oxidación previa de las muestras, así como por la formación de biofilm en las superficies. La variación de temperatura y una mayor exposición a los rayos UV, debido a la ausencia de biopelícula y agua, conducen a una degradación más rápida de las muestras expuestas al aire libre, en comparación con las ubicadas en el mar o el río. Ambos factores conducen a cambios en la morfología y cristalinidad y como consecuencia alteran las propiedades macromoleculares de los plásticos. El retraso de la degradación térmica de los plásticos, cuando se exponen en el mar, se debe a la falta de acumulación de calor en las muestras. Por otro lado, la fotodegradación promovida por UV conduce a la formación de radicales libres, como se muestra en el análisis del índice de carbonilo. Por otro lado, el biofilm puede actuar como capa protectora frente a la radiación, frenando la degradación abiótica producida por la luz ultravioleta.

Esmizadet et al. (2021) empleó el análisis termogravimétrico no isotérmico (TGA) para investigar la degradación del polipropileno (PP) durante la fabricación de un producto simulado en una planta secundaria de proceso y compuestos de madera y plástico. Se llevaron a cabo múltiples ciclos de mezcla por lotes para imitar el reciclaje real. Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Ozawa-Flynn-Wall (OFW), Friedman, Se emplearon los modelos de Kissinger y Augis para calcular la energía de activación aparente ( $E_a$ ). La investigación experimental con análisis termogravimétrico no isotérmico indicó que los termogramas de los reciclados de polipropileno cambiaron a temperaturas más bajas, revelando la presencia de un proceso acelerado de degradación inducido por la formación de radicales durante la escisión de la cadena. El reprocesamiento durante cinco ciclos condujo a una reducción de aproximadamente

un 35 % en el par de mezcla final y a un aumento de más del 400 % en el índice de fluidez del polipropileno

Hattori (2015) en su investigación demostró que el aceite esencial de las plantas y sus principales componentes, terpenos y terpenoides, son un buen solvente para Poliestireno. El EPS poliestireno expandido es reciclable mediante el uso de esos solventes naturales en lugar de los derivados del petróleo. El poder de disolución de los terpenos para PS depende en gran medida de su estructura química. Básicamente, los terpenos cuyo parámetro de solubilidad es cercano al del poliestireno (PS) disuelven mucho PS como se predice en la teoría, y la tasa de disolución es alta como la del tolueno, un solvente a base de petróleo. En los terpenos que contienen oxígeno, los éteres y ésteres muestran un mayor poder de disolución que los alcoholes según la regla del parámetro de solubilidad. Sin embargo, aunque el parámetro de solubilidad es cercano al del PS, los terpenos acíclicos tienen un mayor poder de disolución en comparación con los cíclicos y los terpenos bicíclicos muestran un poder de disolución y una velocidad de disolución relativamente bajos para el PS. Estos hallazgos permiten juzgar si un determinado terpeno es adecuado para el solvente del reciclaje de PS a partir de la estructura química

#### **1.4.2. Antecedentes nacionales**

Lozada Alarcón (2017) evaluó recuperar poliestireno expandido (EPS) con aceite esencial de cáscara de naranja. Los análisis proporcionaron la cantidad idónea para recuperar el poliestireno (1:1 en masa de poliestireno expandido (EPS) por aceite esencial de naranja), a 250 rpm y 75°C. Ni el aceite ni el poliestireno generaron residuos. Se utilizaron platos de poliestireno expandido (EPS) y aceite esencial de naranja, un agitador magnético y cronómetro. Probó diferentes proporciones (rpm y temperatura constantes) y alcanzó buen resultado con solvente extraído de la cascara de naranja con una recuperación del 97,58 %.

Mercedes (2019) diseñó una planta piloto de aceite esencial de eucalipto, con la aplicación de la filosofía “Zero Waste”. Obtuvieron los mejores resultados usando materia prima seca sometida a reducción de tamaño aproximado de 20 mm, extrayendo por arrastre de vapor, no convencional, a 10 bar, 24 minutos, obteniendo 2.8 % (g/g) del producto aceite esencial de eucalipto (densidad = 0.924g/mL). Identificaron la presencia de 26 componentes, por CG-MS dando Eucaliptol (54.88%) y pineno (15.36%) como componentes principales, dentro de los estándares de calidad. Aplicando la filosofía “Residuo Cero”, identificaron los residuos que se generaron en el dominio, eligieron las operaciones unitarias más eco amigables, y elaboraron un plan de manejo de residuos parcial, compuesto por las etapas de minimización, segregación y almacenamiento. Finalmente, S/. 79480, serían necesarios para la construcción y arranque de planta.

Barrionuevo Castro (2020) evaluó la degradabilidad de los materiales plásticos biodegradables (declarados públicamente) y los plásticos convencionales (de un solo uso). Las propiedades físicas (pérdida de peso, variación del pH) y químicas (FTIR), las pruebas de análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y las pruebas mecánicas (Resistencia a la Tracción, % de Elongación) fueron medidas para determinar cambios. Distinguió dos tipos de material biodegradable (A y B) y convencional de PET (C), y los sometió a tres medios (Agua, Suelo e Intemperie) por cuatro meses. Midió el peso antes y después, y encontró mayor pérdida de peso en los materiales biodegradables. El FTIR reveló ligeras variaciones en sus picos y en las absorbancias de las regiones correspondientes a las moléculas biodegradables. El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) presentaba una superficie prácticamente lisa y al cabo de cuatro meses de exposición, se presentaron una serie de arrugas, grietas y porosidades propias del proceso de biodegradación. Al revisar el pH, las muestras sometidas al medio agua, revelaron un pH alto al diluir el Plástico Biodegradable A y Biodegradable B, en cambio el Convencional C se mantuvo constante y en solución neutra.

Las propiedades de Resistencia a la Tracción y % de Elongación, se redujeron en comparación con las bolsas convencionales.

Nolazco Cama et al. (2020) en su investigación mencionaron sobre la extracción y caracterización química del aceite esencial de Eucalipto obtenido por microondas y ultrasonido. La extracción por microondas libre de solventes y la asistencia con ultrasonido, como tecnologías emergentes ofrecen ventajas en la extracción de aceites esenciales, siendo importante la investigación del efecto sobre el rendimiento y la composición del aceite esencial. Se evaluó la influencia de la humedad de las hojas y potencia de extracción sobre el rendimiento del aceite esencial de eucalipto extraído por microondas libre de solventes, y una comparación con la asistencia con ultrasonido. La extracción se realizó por microondas a 300 y 600 watts, a 70, 80 y 90% de humedad en las hojas, seleccionando la potencia que evidenció mayor rendimiento del aceite esencial. Posteriormente, se evaluó el efecto del ultrasonido a 180 watts, 40kHz por 15 minutos sobre el rendimiento y la composición química. Se identificaron los analitos obtenidos por ambos métodos de extracción, mediante cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas (CG-EM). El mayor rendimiento (0,55%) se obtuvo a 600 watts y 90% de humedad mediante microondas. La asistencia con ultrasonido incrementó a 0,80% el rendimiento y 17 analitos adicionales en el aceite esencial. Se identificó como componente mayoritario al eucalipto 1 o 1,8-cineol, encontrado en 42,43% y 37,15% correspondiente a la extracción con microondas libre de solventes y microondas con asistencia de ultrasonido

Uribe et. Al (2010), en la investigación mencionaron sobre la biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario y describieron el aislamiento y la actividad de biodegradación de microorganismos sobre polietileno de baja densidad. Los microorganismos fueron aislados de materiales

plásticos con evidencias de deterioro procedentes de un relleno sanitario de Lima. Las muestras fueron filtradas y preseleccionadas en medio de sales minerales a pH 5,5 y 7, para hongos y bacterias respectivamente. Se aislaron 6 cepas, identificadas como *Pseudomonas* sp. MP3a y MP3b, *Penicillium* sp. MP3a, *Rhodotorula* sp. MP3b, *Hyalodendron* sp. MP3c y una levadura no identificada. La acción degradativa del consorcio microbiano aislado fue evidenciada por variaciones en el espectro infrarrojo del polietileno con respecto al polímero sin tratamiento, observándose la reducción del índice de carbonilo (83,89% a pH 7 y 4,08% a pH 5,5) y de terminaciones con dobles enlaces (19,77% a pH 7 y 6,47% a pH 5,5). Finalmente se determinó el porcentaje de peso perdido por el polietileno sometido a las cepas aisladas, observándose una disminución de 5,4% a pH 7 y 4,8% a pH 5,5

### **1.5. Justificación de la investigación**

El valor teórico de la presente investigación se ampara en el desconocimiento de la degradación química de residuos de polietileno de baja densidad por disolución en aceite esencial de *E. globulus*, que podría dar un sustento teórico al hecho de degradar plástico con solventes naturales y amigables con el ambiente.

La importancia del presente tema de investigación radica en el aprovechamiento de las hojas de eucalipto en la zona andina que son desaprovechadas y terminan convirtiéndose en abono, sin utilizar su aceite esencial.

Es doblemente relevante en el aspecto social. Por un lado, ayuda a maximizar el uso del aceite esencial crudo, incrementando los ingresos de los productores. Y, por otro lado, ayuda a reducir la contaminación ambiental por los residuos plásticos que no pueden ser reutilizados como el plástico de las bolsas de polietileno de baja densidad.

La poca necesidad de purificación de aceite esencial para este fin, degradación química, reduce los costos de producción y la coloca como una alternativa económicamente viable para el tratamiento de plástico.

El uso intencional de procesos de degradación química para eliminar plástico usando sustancias naturales es una metodología amigable con el medio ambiente.

## **1.6. Limitaciones de la investigación**

Las limitaciones para el desarrollo de la investigación, se halla principalmente en el factor económico, pues el costo de algunos análisis realizados, son elevados. Por otro lado, este estudio se limita a la aplicación en el plástico denominado polietileno de baja densidad y su solubilidad en el aceite esencial de eucalipto.

## **1.7. Objetivos**

### **1.7.1. Objetivo general**

Determinar la expresión cinética de la degradación química de residuos de polietileno de baja densidad (PEBD) por disolución en aceite esencial de *Eucalyptus globulus*.

### **1.7.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar la influencia del tiempo en la tasa de degradación del PEBD.
- b) Determinar la influencia de la temperatura en la constante cinética de la Ley de velocidad.
- c) Conocer el efecto de degradación química en las propiedades mecánicas del PEBD.

## **1.8. Hipótesis**

### **1.8.1. Hipótesis general**

La cinética de la degradación del PEBD por exposición en aceite esencial de eucalipto es de pseudo primer orden y su constante de velocidad depende de la temperatura.

### **1.8.2. Hipótesis específicas**

- a) El tiempo de exposición del PEBD en AEEG tiene un efecto directo en la tasa de disminución del peso del PEBD.
- b) La temperatura de tratamiento tiene efecto directo en el incremento de la constante de velocidad de corrosión del PEBD en AEEG.
- c) La degradación química tiene influencia en las propiedades mecánicas del PEBD.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco conceptual

#### 2.1.1. Aceite esencial

Las plantas son capaces de sintetizar dos tipos de aceites: aceites fijos y aceites esenciales. Los aceites fijos consisten en ésteres de glicerol y ácidos grasos (triglicéridos o triacilglicerol), mientras que los aceites esenciales son mezclas de compuestos orgánicos volátiles que se originan de una sola fuente botánica y contribuyen al sabor y fragancia de una planta. Muchos de los componentes individuales que se encuentran en los aceites esenciales son utilizados por los insectos para comunicarse y se conocen como "feromonas de insectos". Aunque son mucho más complejas en las plantas, cumplen una función similar de comunicación, generalmente como atrayentes para los insectos, ocasionalmente como mensajes a otras plantas del mismo género. Todas estas funciones requieren volatilidad y los aceites esenciales también se conocen como aceites volátiles. La palabra 'esencial' se usa para reflejar la naturaleza intrínseca o esencia de la planta, y 'aceite' se usa para indicar un líquido que es insoluble e inmiscible con agua. Los aceites son más solubles en disolventes lipofílicos (no polares, similares a los lípidos) como el cloroformo o el benceno (Tisserand y Young, 2013).

#### 2.1.2. Composición del aceite esencial de eucalipto

Nolazco Cama *et al.* (2020), evaluaron la influencia del ultrasonido y las microondas sobre el rendimiento y composición del aceite esencial de eucalipto. En la Tabla 1 se puede observar la composición química que muestra el aceite esencial.

**Tabla 1**  
*Composición química del aceite esencial de eucalipto*

N°	COMPONENTES	MOLECULA	ÁREA (%)	
			EMLS	EMAU
1	$\alpha$ - Pineno	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	11,10%	11,19%
2	D-Limoneno	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub>	5,36%	5,08%
3	Eucaliptol	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	42,43%	37,15
4	$\alpha$ -Terpineol	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	2,23%	0,88%
5	$\alpha$ -terpineol acetato	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	3,34%	6,78%
6	$\alpha$ -Gurjuneno	C <sub>15</sub> H <sub>25</sub>	3,88%	4,03%
7	Aromadendreno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	10,26%	10,14%
8	L-Alloaromadendreno	C <sub>15</sub> H <sub>25</sub> O	3,17%	3,21%
9	Varidifloreno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	4,03%	3,26%
10	Globulol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	3,27%	4,52%
11	Viridiflorol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	1,18%	1,88%
12	Epiglobulol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	--	1,06%
13	$\beta$ -Pineno	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0,57%	0,56%
14	$\beta$ -Mirceno	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	0,63%	0,47%
15	$\alpha$ -Felandreno	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0,13%	0,09%
16	p-Cimeno	C <sub>9</sub> H <sub>13</sub>	0,15%	0,48%
17	$\gamma$ -Terpineno	C <sub>9</sub> H <sub>15</sub>	0,62%	0,20%
18	L-4-Terpineol	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	0,37%	0,31%
19	Acetato de geraniol	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	0,42%	0,76%
20	Isoledeno	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	0,48%	0,56%
21	$\alpha$ -Copaeno	C <sub>16</sub> H <sub>23</sub>	0,17%	--
22	$\alpha$ -Cubebeno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	--	0,13%
23	Cadineno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,18%	--
24	$\beta$ -Gurjuneno	C <sub>15</sub> H <sub>25</sub>	0,66%	0,75%
25	$\beta$ -Cariofileno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,14%	--
26	$\alpha$ -Panasinseno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,15%	--

27	Sativeno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	--	0,35%
28	Eremofileno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,63%	--
29	α-Cariofileno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,12%	--
30	γ-Gurjuneno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,33%	0,38%
31	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	--	0,64%
32	Feniletil isovalerato	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	0,43%	--
33	Elixeno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,58%	--
34	γ-Muuroleno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	--	0,47%
35	α-amorfeno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	--	0,23%
36	Cadineno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,18%	--
37	γ-Cadineno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,33%	0,34%
38	δ-Cadineno	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub>	0,18%	0,30%
39	Dehidroaromadendreno	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	0,60%	1,03%
40	Epiglobulol	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,60%	0,17%
41	α-Fameseno	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	--	0,17%
42	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O		0,38%	0,27%
43	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	0,34%	0,21%
44	β-Eudesmol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	0,20%	0,56%
45	Spatulenol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	--	0,26%
46	Ledol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	0,29%	0,50%
47	Bis (2-etilhexil) éster del ácido Hexanedioico	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	0,03%	--
48	γ-Cadinol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	--	0,06%
49	α -Cadinol	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	--	0,03%
50	Guaniol	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	--	0,20%
51	4-metilen-1-metil-2(2-metil-1-propen-1yl)-1-vinil-cicloheptano	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub>	--	0,18%
52	α-terpinoleno	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	--	0,06%
<b>Total</b>			<b>100%</b>	<b>100%</b>

*Nota: Nolazco Cama et al. (2020)*

### 2.1.3. Polietileno de baja densidad (PEBD)

El polietileno (PE) es un plástico ampliamente utilizado con propiedades adaptables basadas en la conformación molecular (Bartczak y Kozanecki, 2005; Hiss *et al.*, 1999; Hobeika *et al.*, 2000; Schrauwen *et al.*, 2004; Vasile y Pascu, 2005), con aplicaciones que van desde empaques de película y aislamiento eléctrico hasta contenedores y tuberías. El PE se caracteriza principalmente en función de la densidad y el grado de ramificación de la molécula. El polietileno de baja densidad (LDPE) es un polímero resistente y flexible caracterizado por ramas largas que no se compactan bien en los cristalitos. A medida que las cadenas se vuelven más lineales, como en el polietileno de alta densidad (HDPE), las moléculas pueden compactarse más. El polietileno de peso molecular ultra alto (UHMWPE) tiene cadenas lineales largas que pueden transportar carga a lo largo de la estructura del polímero. Finalmente, el polietileno reticulado (PEX) tiene enlaces reticulados que mejoran las propiedades a altas temperaturas y la resistencia química (Brown *et al.*, 2007).

### 2.1.4. Cinética de degradación

La medida de actividad en estas pruebas de degradación suele ser una evaluación cualitativa de la cobertura de la superficie. Problemas adicionales con este método son la falta de una relación con un entorno natural, limitadas en el ensayo (Kaplan *et al.*, 1994).

Las tasas de biodegradación están influenciadas por muchos factores ambientales y las características del componente polimérico de la película, tales como estructura, morfología, cristalinidad, grupos funcionales, solubilidad y peso molecular también influyen en las tasas de degradación química (Kroschwitz, 1989).

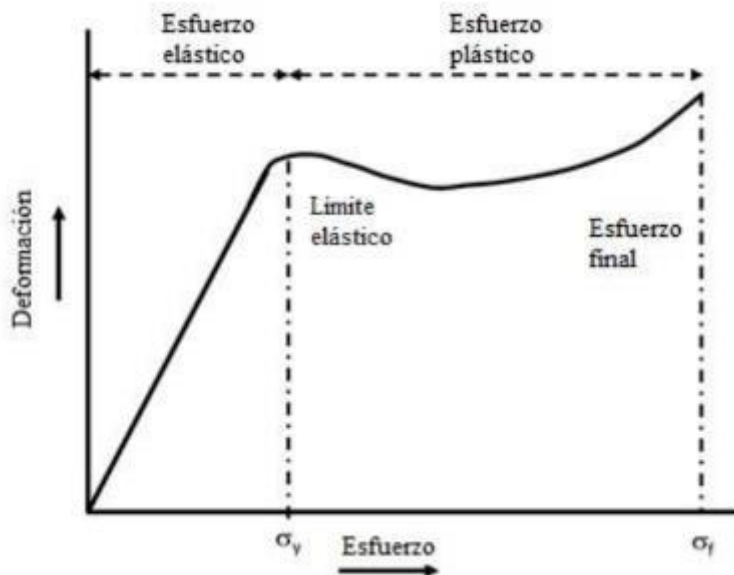
Por ejemplo, el cribado inicial de películas poliméricas en sistemas aeróbicos y anaeróbicos para evaluar la producción de dióxido de carbono o metano, la demanda biológica de oxígeno o la demanda química de oxígeno proporciona herramientas útiles para evaluar la

susceptibilidad de polímeros y películas al ataque microbiano. Se deben mantener y ejecutar controles cuidadosos junto con las muestras de prueba debido a la posible confusión de los resultados debido a materiales extraños, degradación de aditivos en las películas, variaciones en las condiciones e incorporación microbiana de carbono en la biomasa (Green, 1991).

### 2.1.5. Propiedades mecánicas de polímeros

La Figura 1 explica como es el comportamiento de los polímeros en general, cuando se le somete a una prueba de evaluación mecánica. Se distinguen dos regiones bien definidas, la región de Elasticidad y la región de Plasticidad. En la región de elasticidad, se observa una fase lineal, que se conoce como de proporcionalidad, pues cumple con la Ley de Hooke. Hasta aquí, el polímero tiene la capacidad de regresar a su estado inicial. Al pasar a la región de Plasticidad, no hay marcha atrás, y la deformación es permanente, y si se sigue aplicando el esfuerzo, este se romperá inevitablemente (Liu *et al.*, 2017).

**Figura 1**  
*Gráfico tensión-deformación de un polímero*



*Nota: Liu et al. (2017)*

### **2.1.6. Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier**

La espectroscopia FTIR es una técnica espectroscópica vibratoria que se puede utilizar para sondear ópticamente los cambios moleculares asociados con los tejidos enfermos (Hospodarova *et al.*, 2018). Las bandas espectrales en los espectros de vibración son específicas de cada molécula y brindan información directa sobre la composición química. Los picos de FTIR son relativamente estrechos y, en muchos casos, se pueden asociar con la vibración de un enlace químico particular (o un solo grupo funcional) en la molécula (Ong *et al.*, 2020; Petit y Puskar, 2018).

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación es de enfoque cuantitativo, básico. El nivel de investigación es correlacional explicativa (causa-efecto). El diseño de la investigación es experimental.

#### 3.2. Población y muestra

##### Población

PEBD usado en supermercados para envases diversos de artículos pequeños

##### Muestra

La muestra fue no probabilística por conveniencia constituida por bolsas de envase de especias de 19 cm x8.8 cm (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2008).

#### 3.3. Operacionalización de variables

**Tabla 2**

*Operacionalización de variables*

<b>Tipo</b>	<b>Variable</b>	<b>Indicadores</b>
Dependiente	Cinética de degradación	Orden de reacción y constante de velocidad
Independiente	Tiempo	Pérdida de peso
Independiente	Temperatura	Variación de la constante de velocidad de reacción
Independiente	Propiedades mecánicas	Strength, Breaking Strain, Toughness

### **3.4. Instrumentos**

#### **3.4.1. Espectrofotómetro IR con transformada de Fourier**

Es un dispositivo utilizado en química y ciencias de materiales para analizar la composición de sustancias mediante la espectroscopia infrarroja. Utiliza la técnica de transformada de Fourier para medir la absorción de luz infrarroja por una muestra en función de la longitud de onda. Esto permite obtener un espectro completo de absorción, que se utiliza para identificar componentes químicos y analizar sus estructuras moleculares.

#### **3.4.2. TA-HD plus c.texture Analyzer**

Es un dispositivo utilizado en la industria alimentaria y en la investigación de textura. Se utiliza para medir y analizar las propiedades físicas y la textura de alimentos y otros materiales. El analizador realiza pruebas de textura, como compresión, cizallamiento y extrusión, y registra datos precisos sobre la dureza, elasticidad, viscosidad y otras características texturales de un producto. Estos datos son útiles para evaluar la calidad de los alimentos, desarrollar nuevos productos y garantizar la consistencia en la producción.

#### **3.4.3. Balanza de precisión**

Es un instrumento de medición utilizado para determinar con alta exactitud la masa de un objeto o sustancia. Está diseñada para proporcionar mediciones extremadamente precisas y se utiliza en entornos donde se requiere una alta precisión, como laboratorios de química, farmacología, investigación científica y control de calidad industrial. Se requiere de una balanza que registre el peso hasta 1 milésimo de gramos de precisión.

### **3.5. Procedimiento**

#### **3.5.1. Degradación del PEDB con aceite esencial de eucalipto para la determinación de la cinética**

Para ambos casos (solubilidad en aceite esencial de eucalipto y gasolina) se tomó muestras de un mismo origen de PEDB y con las mismas dimensiones. Se tomó un paquete

cuyo contenido fue de 50 unidades y se pesó el conjunto, de esta manera se obtuvo un peso promedio de 0.6093 g. por cada muestra, los cuales fueron tratadas por espacio de 7 horas en las soluciones de gasolina y una mezcla de aceite esencial de eucalipto (10%) y etanol a las temperaturas de 19 °C y 40 °C. Las dimensiones de la muestra fueron 19 cm x 8.8 cm., con lo cual se tiene un área efectiva de 334.4 cm<sup>2</sup>, lo cual influye en la velocidad de disolución.

### **3.5.2. Disolución del PEBD para las pruebas de espectroscopia infrarroja.**

Para cada experimento, se utilizó 1 g de aceite esencial en un tubo de ensayo, luego se agregaron diferentes cantidades de polietileno de baja densidad, se anotaron los datos de las variables dependientes cada hora hasta un máximo de 10 horas. Todos los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente.

Además, para recuperar el PEBD disuelto en aceite esencial, se retiró el plástico degradado y se añadió 1 mL de etanol al plástico y se agitó durante 2 min. A continuación, se lavó tres veces con 1 mL de isopropanol. Finalmente, el sólido blanco se exprimó entre capas de papel de filtro y se dejó secar a temperatura ambiente por 1 hora. Los datos infrarrojos (IR) se recopilaron utilizando el espectro FTIR, se analizó en primera instancia, cada espectro por separado, y posteriormente se compararon, ambos espectros (Aceite esencia y PEBD).

Los espectros infrarrojos por transformada de Fourier (ATR-FTIR) del aceite esencial y del polietileno de baja densidad tratado, se obtuvo utilizando el espectrómetro de transformación infrarroja de Fourier Nicolet iS50 (Thermo Scientific, Alemania) equipado con un accesorio de rebote ATR Miracle Diamond 3 (Thermo Scientific). Los parámetros de medida fueron:

#### **Aceite esencial:**

- 128 barridos

- Número de onda de 600 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .
- Resolución de 2  $\text{cm}^{-1}$ .
- 0.15 mL de muestra.

#### **Polietileno de baja densidad:**

- 128 barridos
- Número de onda de 600 a 3500  $\text{cm}^{-1}$ .
- Resolución de 2  $\text{cm}^{-1}$ .

#### **3.5.3. Pruebas de degradación mecánica**

Se empleó el equipo denominado TA.HD plus C Texture Analyser, para medir las propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad. Los parámetros establecidos de prueba fueron:

- Modo: Tensión
- Velocidad de prueba: 8.33 mm/s
- Velocidad post prueba: 10 mm/s
- Distancia: 200 mm
- Sensibilidad de rotura: 0.5 g

#### **3.5.4. Prueba de hipótesis para las propiedades mecánicas del PEBD**

Se determinó el análisis de varianza para los datos de propiedades mecánicas del PEBD y al resultar significativa ( $p < 0.05$ ) se aplicó la Prueba de Tukey.

### **3.6. Análisis de datos**

#### **3.6.1. Diseño completamente al azar**

**Tabla 3***Diseño completo al azar*

Tratamiento	Variable medida		
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
1	$\eta_{1A}$	$\eta_{2A}$	$\eta_{3A}$
2	$\eta_{1B}$	$\eta_{2B}$	$\eta_{3B}$
...	...	...	...
N	$\eta_{1N}$	$\eta_{2N}$	$\eta_{3N}$

**3.6.2. Análisis de varianza****Tabla 4***Análisis de varianza para un diseño completo al azar*

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F <sub>0</sub>	p
Tratamiento					
Error					
Total					

**En la prueba de Análisis de varianza las hipótesis son:**

- H<sub>0</sub>: No existe diferencia entre los tratamientos.
- H<sub>1</sub>: Al menos uno de los tratamientos es diferente a los demás.

**Toma de decisión:**

Si  $p > 0,05$  se acepta la H<sub>0</sub>

Si  $p < 0,05$  se rechaza la H<sub>0</sub> en favor de la H<sub>1</sub>

**3.6.3. Análisis de regresión**

El análisis de regresión entre el tiempo de disolución y las propiedades mecánicas y la pérdida de peso, se ejecutó con el programa MS Excel, primero graficando las variables dependientes con la dependiente, y posteriormente, añadiendo la línea de tendencia, probando todas las que ofrece el programa, hasta que se encuentra el modelo con mejor bondad de ajuste (coeficiente de determinación, R<sup>2</sup>).

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Tratamiento de las muestras en gasolina a temperatura ambiente

Se vierte un litro de gasolina en un vaso de precipitado (300 ml para la prueba) y luego se adiciona las muestras para iniciar el proceso de disolución parcial del plástico; cada lectura de peso se realizó por triplicado habiendo obtenido un total de 7 lecturas pues el experimento se llevó a cabo durante ese periodo; el tratamiento se realizó a la temperatura ambiente cuyo valor promedio fue de 19 °C.

En la Tabla 5 se muestra los resultados de los cambios de peso obtenidos, asimismo en la última columna se muestra el valor promedio de lectura de cada hora.

**Tabla 5**

*Reporte de la variación de los pesos en función del tiempo en solución de gasolina*

Tiempo (h)	PEBD_G1 (g)	PEBD_G2 (g)	PEBD_G3 (g)	Promedio (g)
0	0.6093	0.6093	0.6093	0.6093
1	0.5781	0.5801	0.5819	0.58003
2	0.5714	0.5710	0.5745	0.5723
3	0.5678	0.5662	0.5712	0.5684
4	0.5666	0.5645	0.5697	0.5669
5	0.5640	0.5638	0.5672	0.5650
6	0.5625	0.5626	0.5652	0.5634
7	0.5583	0.5600	0.5626	0.5603

#### 4.1.2. Tratamiento de las muestras con aceite esencial de eucalipto al 10% en volumen a temperatura ambiente

Se vierte 100 ml de aceite esencial en un vaso de precipitado y luego se adiciona 900 ml. de alcohol etílico al 96% en peso y luego se adiciona las muestras para iniciar el proceso de disolución parcial del plástico; cada lectura de peso se realizó por triplicado habiendo obtenido un total de 7 lecturas pues el experimento se llevó a cabo durante ese periodo; el tratamiento se realizó a la temperatura ambiente cuyo valor promedio fue de 19 °C

En la Tabla 6 se muestra los resultados de los cambios de peso obtenidos, asimismo en la última columna se muestra el valor promedio de lectura de cada hora.

**Tabla 6**

*Reporte de la variación de los pesos en función del tiempo en solución alcohólica de aceite esencial de eucalipto*

Tiempo (h)	PEBD_E1 (g)	PEBD_E2 (g)	PEBD_E3 (g)	Promedio (g)
0	0.6093	0.6093	0.6093	0.6093
1	0.6022	0.5987	0.6027	0.6012
2	0.5981	0.5936	0.6002	0.5973
3	0.5922	0.5837	0.5886	0.58816667
4	0.5862	0.5801	0.5820	0.58276667
5	0.5850	0.5723	0.5768	0.57803333
6	0.5834	0.5675	0.5665	0.57246667
7	0.5750	0.5612	0.5637	0.56663333

En la figura 2 se muestra el proceso de disolución de las muestras de plástico PEBD en soluciones de gasolina de 95 octanos y aceite esencial de eucalipto en alcohol etílico

**Figura 2**

*Proceso de disolución de las muestras de polietileno de baja densidad en gasolina y solución de aceite esencial de eucalipto en alcohol etílico.*

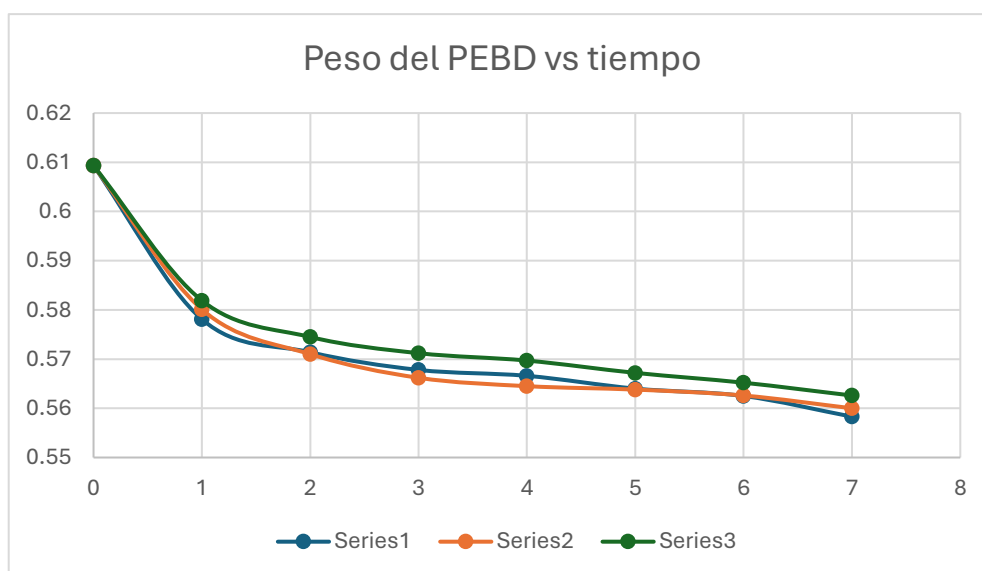


#### 4.1.3. Resultados del tratamiento de datos de la degradación del PEBD tratadas con gasolina y aceite esencial de eucalipto en etanol

En la figura 3 se muestra los cambios de masa producidos durante el proceso de tratamiento de un PEBD de baja densidad utilizando gasolina como solvente

**Figura 3**

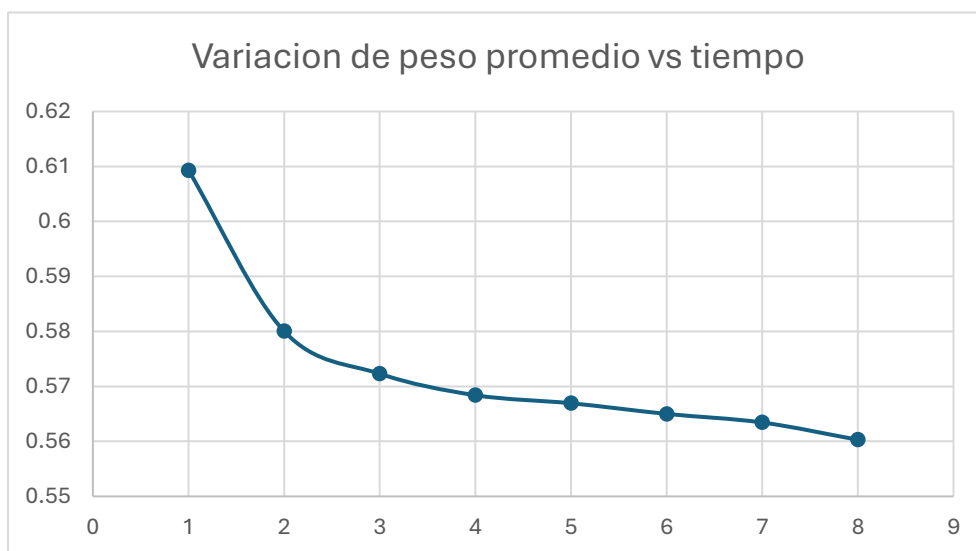
*Cambio de peso de las muestras tratadas con gasolina en función del tiempo*



En la figura 4 se muestra el valor promedio de la variación de los pesos en función al tiempo para la muestra tratada con gasolina. Estos datos son de importancia pues permiten obtener el modelo cinético de degradación.

**Figura 4**

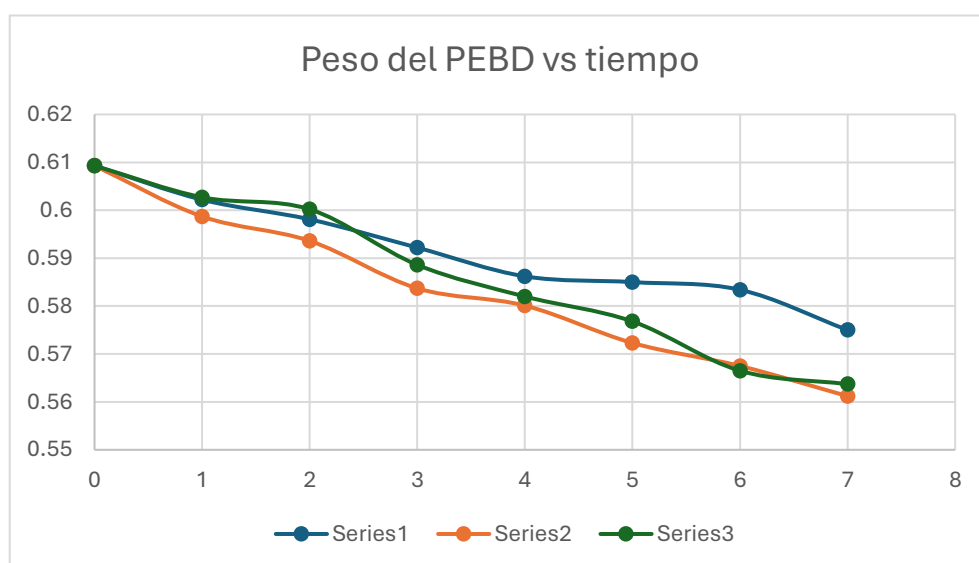
*Peso promedio de las muestras de PEBD función al tiempo de exposición*



En la figura 5 se muestra la variación de los pesos de cada muestra en función al tiempo tratadas con solución de aceite esencial de eucalipto al 10% en etanol

**Figura 5**

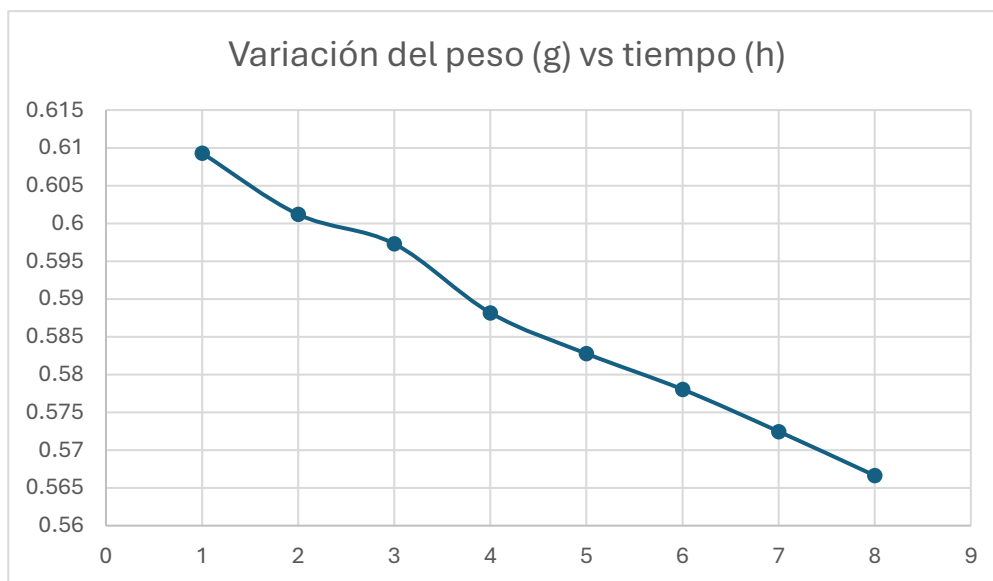
*Variación de pesos de PEBD en función al tiempo para cada muestra medida por triplicado.*



En la figura 6 se observa el valor medio de la variación de pesos en función al tiempo de las muestras tratadas con solución de aceite esencial de eucalipto al 10% en alcohol etílico.

**Figura 6**

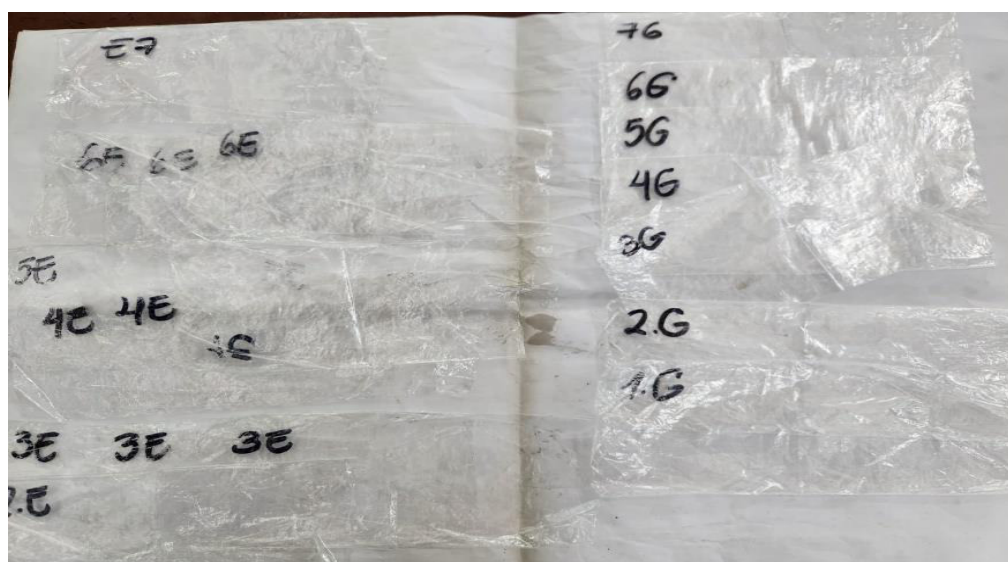
*Valor promedio de la variación de los pesos en función al tiempo*



En la figura 7 se observa el estado final de las muestras tratadas tanto con gasolina como con la solución de aceite esencial al 10% en alcohol etílico. En ambos casos se nota la degradación debido a que experimenta cambios físicos como el incremento de la rugosidad.

**Figura 7**

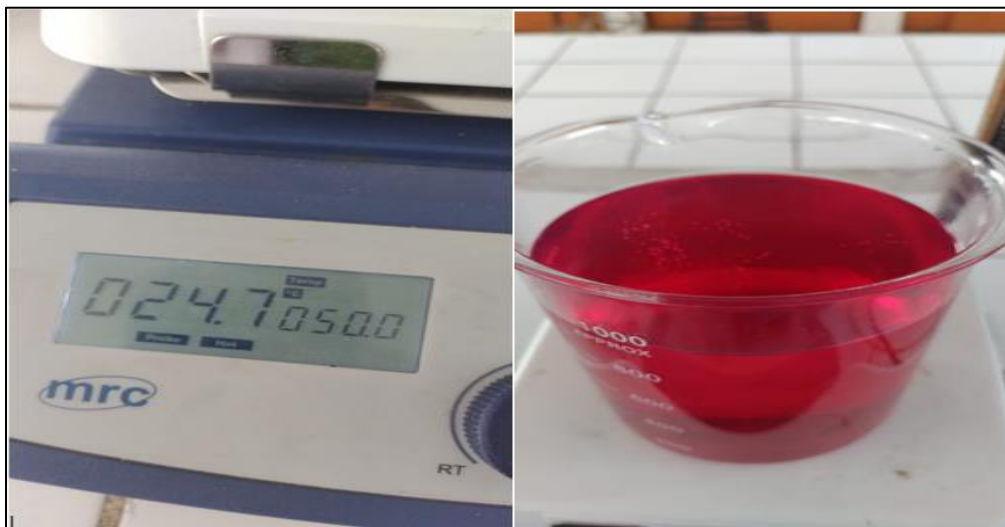
*Muestras tratadas con aceite esencial de eucalipto (izquierda) y muestras tratadas con gasolina (derecha)*



#### 4.1.4. Tratamiento de las muestras tratadas con gasolina a 40 °C

Se vierte un litro de gasolina en un vaso de precipitado (300 ml para la prueba) y se calienta en una plancha con agitación tal como se muestra en la figura 8.

**Figura 8**  
*Tratamiento de las muestras en gasolina a 40 °C*



Las muestras se van pesando cada hora; sin embargo, en este caso solo se pudo tomar cuatro muestras dado que luego de cuatro horas de tratamiento, las muestras se degradaron totalmente, es decir se disolvió en la gasolina. En la Tabla 7 se muestra los resultados experimentales.

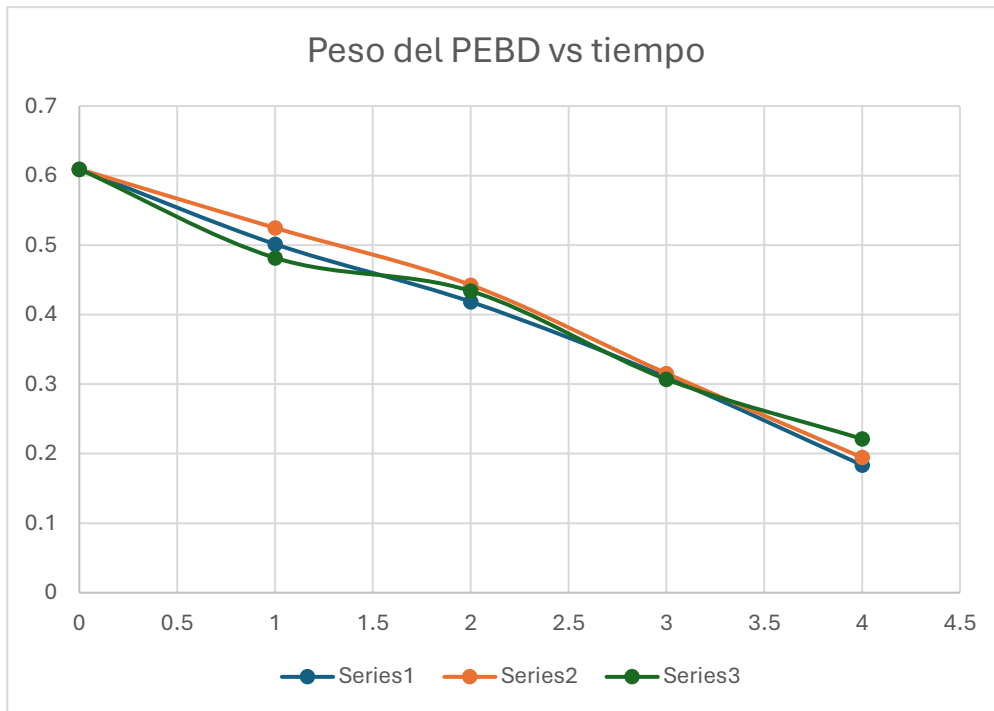
**Tabla 7**  
*Reporte de la disolución del PEBD en gasolina de 95 octanos*

Tiempo (h)	PEBD_G1 (g)	PEBD_G2 (g)	PEBD_G3 (g)	Promedio (g)
0	0.6093	0.6093	0.6093	0.6093
1	0.5014	0.5247	0.4817	0.5026
2	0.4184	0.4426	0.4339	0.43163333
3	0.31	0.3155	0.3069	0.3108
4	0.1835	0.1945	0.2212	0.19973333

En la figura 9 se observa la evolución temporal de la masa de las muestras de PET tratadas con gasolina a 30 °C para cada una de las tres muestras

**Figura 9**

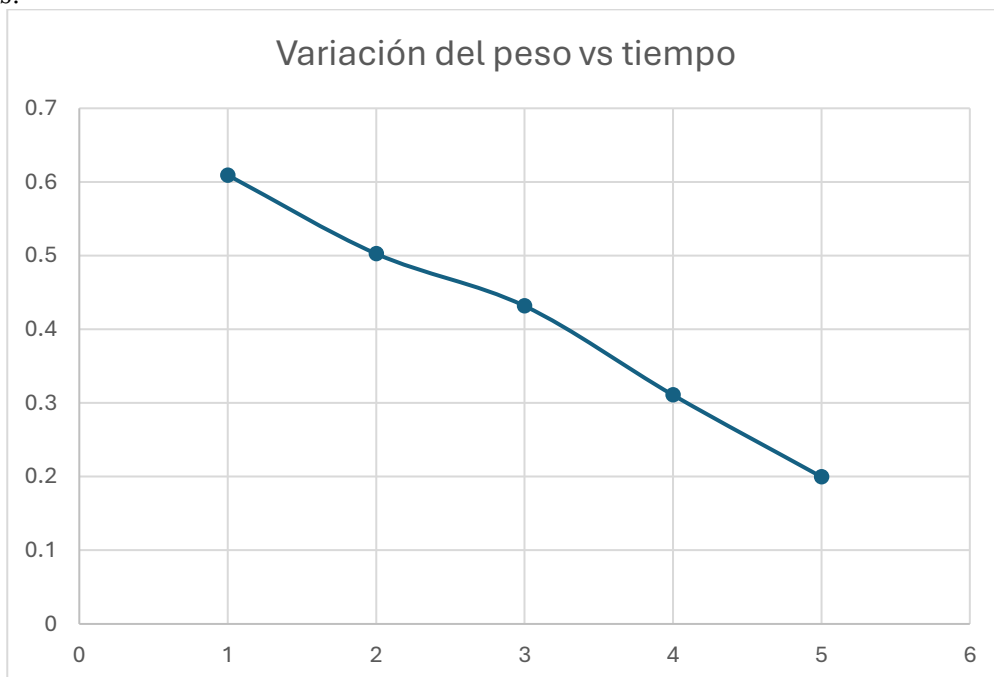
*Variación del peso del PEBD tratada con gasolina de 95 octanos.*



En la figura 10 se muestra el valor promedio de la variación del peso en función al tiempo de las muestras tratadas con gasolina de 95 octanos.

**Figura 10**

*Variación del peso en función del tiempo para la muestra tratada con gasolina de 95 octanos.*



#### 4.1.5. Tratamiento de las muestras tratadas con una solución al 10% en volumen con alcohol etílico a 40 °C

Se vierte 100 ml de aceite esencial de gasolina en un vaso de precipitado y luego se adiciona 900 ml. de alcohol etílico al 96% en peso y luego se adiciona las muestras para iniciar el proceso de disolución parcial del plástico; cada lectura de peso se realizó por triplicado habiendo obtenido un total de 6 lecturas pues el experimento se llevó a cabo durante ese periodo; el tratamiento se realizó a la temperatura de 40 °C. En la Tabla 8 se muestra los resultados de los cambios de peso obtenidos, asimismo en la última columna se muestra el valor promedio de lectura de cada hora.

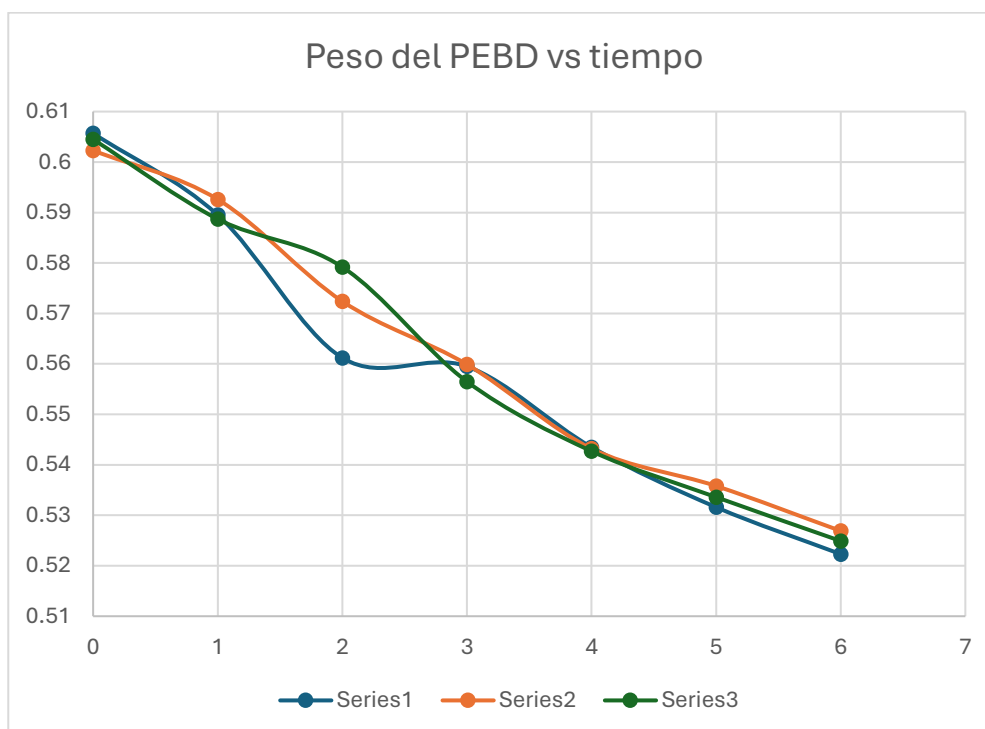
**Tabla 8**

*Reporte de los pesos obtenidos mediante tratamiento del PEBD con solución de aceite esencial*

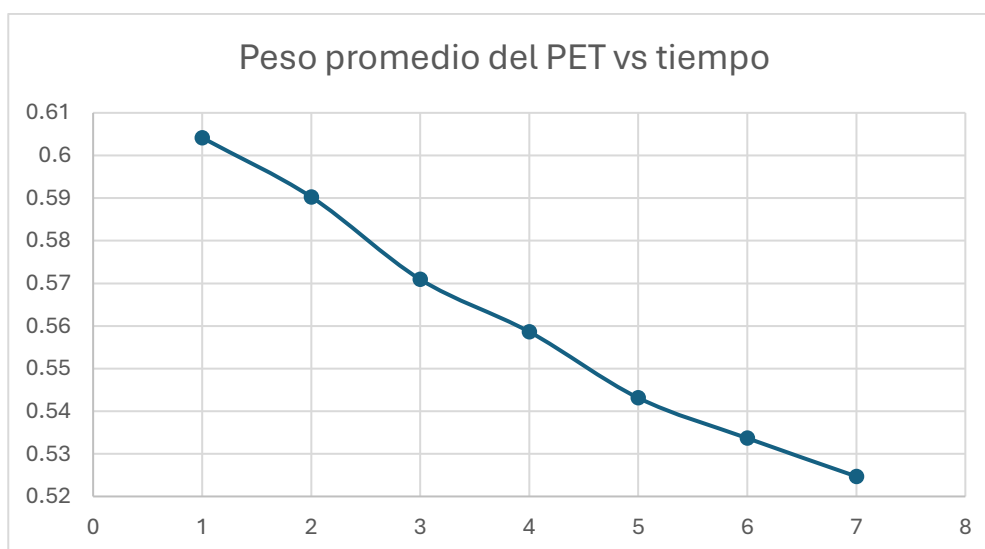
Tiempo (h)	PEBD_E1 (g)	PEBD_E2 (g)	PEBD_E3 (g)	Promedio (g)
0	0.6093	0.6093	0.6093	0.6093
1	0.5895	0.5926	0.5887	0.59026667
2	0.5612	0.5724	0.5792	0.57093333
3	0.5595	0.5599	0.5565	0.55863333
4	0.5435	0.5432	0.5427	0.54313333
5	0.5316	0.5358	0.5336	0.53366667
6	0.5223	0.5269	0.5249	0.5247

**Figura 11**

Resultado gráfico de los datos reportados de las muestras tratadas con solución de aceite esencial al 10% en alcohol etílico

**Figura 12**

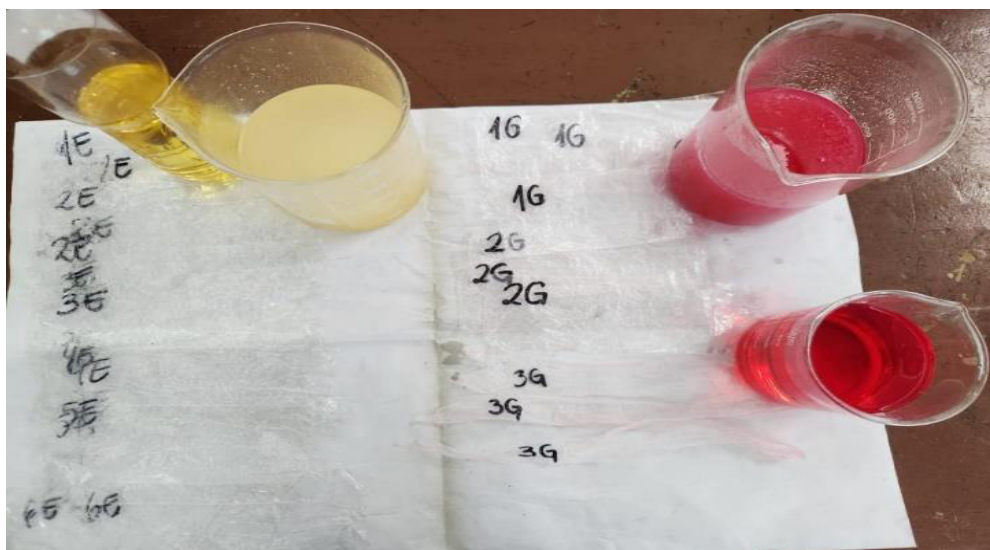
Representación gráfica de la masa promedio resultado del tratamiento con solución de aceite esencial de eucalipto al 10% en alcohol etílico



En la figura 13 se observa el resultado final del tratamiento realizado de las muestras tanto con gasolina como con la solución de aceite de eucalipto al 10% en alcohol etílico

**Figura 13**

Muestras de PEBD tratadas y la solución de aceite esencial de eucalipto puro y aceite esencial de eucalipto al 10% en alcohol etílico (izquierda) y muestras tratadas con gasolina a 40 °C

**4.2. Cálculo de los parámetros cinéticos**

Los parámetros cinéticos se obtienen del siguiente modo:

La ley de velocidad, en forma general viene dada por

$$-\frac{dm}{dt} = kAm^n \quad (1)$$

Al utilizar el método integral se tiene

$$\frac{m^{1-n}}{(1-n)} = -k \times A \times t + \frac{m_0^{1-n}}{(1-n)} \quad (2)$$

Haciendo uso de los datos experimentales se debe obtener los valores de  $n$  y el producto  $k \times A$  y luego el valor de  $k$  puesto que ya se conoce el valor de  $A$ .

**4.3. Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con gasolina a temperatura ambiente.**

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo, para lo cual se toman los datos de dos en dos dado que se tiene dos variables, del siguiente modo:

$$0.58003333^{1-n} = -(kA) \times (1) \times (1 - n) + 0.6093^{(1-n)}$$

$$0.5723^{1-n} = -(kA) \times (2) \times (1 - n) + 0.6093^{(1-n)}$$

$$\text{Resolviendo se obtiene: } kA = 2.451062 \quad n = 1$$

Se repite el proceso del mismo modo para los demás datos

$$kA = 2.45259 \quad n = 1$$

$$kA = 2.232789 \quad n = 1$$

$$kA = 2.49903 \quad n = 1$$

El valor de  $n$  siempre es constante e igual a 1, mientras que el valor de  $kA$  debe tomarse un promedio, cuyo valor medio es: 2.410353

A partir de este valor se obtiene la constante cinética, es decir:

$$k = \frac{2.410353}{A} = \frac{2.410353}{8.8 \times 19 \times 2} = 0.007208 \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

$$n = 1$$

Por tanto, el modelo cinético correspondiente es

$$-\frac{dm}{dt} = 0.007208 \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-2} A \times m$$

#### 4.3.1. Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con eucalipto a temperatura ambiente.

Siguiendo el mismo procedimiento se obtiene:

$$k = \frac{2.100777}{A} = \frac{2.100777}{8.8 \times 19 \times 2} = 0.0062822 \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

$$n = 1$$

$$-\frac{dm}{dt} = 0.0062822 \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-2} A \times m$$

#### 4.3.2. Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con gasolina a 40 °C

Para este caso se obtiene los siguientes parámetros

$$k = \frac{2.870232}{A} = \frac{2.870232}{8.8 \times 19 \times 2} = 0.0085832 h^{-1} cm^{-2}$$

$$n = 1$$

$$-\frac{dm}{dt} = 0.0085832 h^{-1} cm^{-2} A \times m$$

Nota: En esta etapa se obtuvo solo 4 datos debido a la disolución completa del PET por tanto esta prueba ha sido evaluada en un tiempo limitado.

#### 4.3.3. Parámetros cinéticos de las muestras tratadas con solución de aceite esencial de eucalipto a 40 °C

Para este caso se obtiene los siguientes parámetros

$$k = \frac{2.457907}{A} = \frac{2.457907}{8.8 \times 19 \times 2} = 0.0073502 h^{-1} cm^{-2}$$

$$n = 1$$

$$-\frac{dm}{dt} = 0.0073502 h^{-1} cm^{-2} A \times m$$

#### 4.4. Cinética de las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del PEBD evaluadas también fueron objeto de estudio, dado que no hubo disolución del plástico, era probable que, al menos su estructura se haya visto debilitada por el tratamiento con aceite esencial de eucalipto. Las propiedades evaluadas fueron tres y se conocen como parámetros: “Strength”, “Breaking strain” y “Toughness”. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para estos tres parámetros, y el análisis de datos que permiten discernir, si existe una cinética de degradación a este nivel.

La Tabla 9, corresponde a los resultados de los parámetros mecánicos, donde se observan a cada tiempo (h) tratado con aceite esencial de eucalipto. El tratamiento 1 es el testigo y a partir del tratamiento 2 al 11 son las muestras de PEBD tratados por 10 horas. Cada muestra se midió a cada hora, para ver el efecto en cada parámetro de estudio. De acuerdo con el análisis de varianza, en todos los parámetros se encontraron diferencias significativas entre las muestras, y se aplicó la prueba de Tukey.

**Tabla 9**

*Propiedades mecánicas del polietileno tratado durante 10 horas*

Tratamiento	Parámetros mecánicos		
	Strength	Breaking strain	Toughness
	MPa	%	MJ/m <sup>3</sup>
<b>1 (Testigo)</b>	21,92 ± 1,96 <sup>a, b</sup>	194,02 ± 14,62 <sup>a</sup>	25,96 ± 1,30 <sup>a</sup>
<b>2</b>	21,60 ± 1,70 <sup>a, b</sup>	180,99 ± 17,33 <sup>a</sup>	26,00 ± 5,72 <sup>a</sup>
<b>3</b>	25,68 ± 2,18 <sup>a</sup>	148,11 ± 4,65 <sup>b</sup>	18,84 ± 2,43 <sup>b</sup>
<b>4</b>	20,72 ± 1,07 <sup>a, b, c</sup>	133,02 ± 3,61 <sup>b, c</sup>	14,42 ± 2,49 <sup>b</sup>
<b>5</b>	20,61 ± 2,12 <sup>b, c</sup>	141,08 ± 10,63 <sup>b</sup>	13,62 ± 0,60 <sup>b, c</sup>
<b>6</b>	19,84 ± 2,26 <sup>b, c</sup>	99,73 ± 9,26 <sup>d</sup>	6,71 ± 0,71 <sup>d, e</sup>
<b>7</b>	19,86 ± 1,82 <sup>b, c</sup>	138,94 ± 2,16 <sup>b</sup>	12,82 ± 0,80 <sup>b, c, d</sup>
<b>8</b>	20,17 ± 1,28	83,56 ± 6,56 <sup>d</sup>	3,84 ± 0,32 <sup>e</sup>
<b>9</b>	20,15 ± 0,90 <sup>b, c</sup>	91,87 ± 2,55 <sup>d</sup>	6,07 ± 0,54 <sup>e</sup>
<b>10</b>	19,16 ± 2,02 <sup>b, c</sup>	96,04 ± 14,01 <sup>d</sup>	4,92 ± 0,97 <sup>e</sup>
<b>11</b>	16,38 ± 0,92 <sup>c</sup>	106,34 ± 2,45 <sup>c, d</sup>	7,60 ± 1,31 <sup>c, d, e</sup>

*Nota: Las medias que no comparten una letra en la misma columna son significativamente diferentes*

### Parámetro “Strength”

La Tabla 10 muestra el análisis de varianza del parámetro “Strength”, el mismo que fue significativo ( $p < 0,05$ ), es decir que, al menos un tratamiento es diferente a los demás, con respecto a esta variable de estudio, esto obligó a una prueba de comparación múltiple de Tukey (Tabla 9). Por otro lado, se muestra cierta tendencia de esta propiedad a disminuir con el tiempo; sin embargo, el coeficiente de determinación es bajo ( $R^2 = 69.42\%$ ).

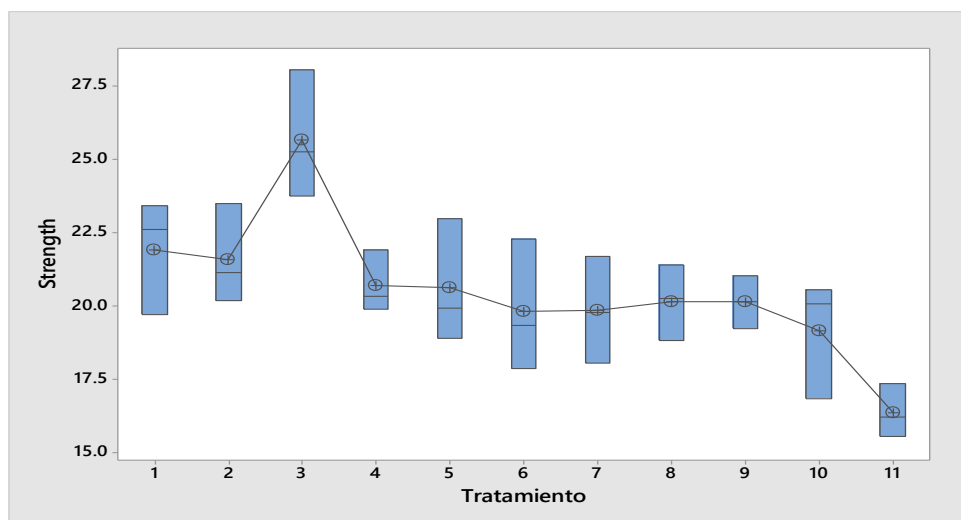
La Figura 14 muestra el diagrama de cajas o Boxplot, donde aprecia que el parámetro “Strength”, presenta una disminución en el tiempo, sin embargo, hay dos cosas que debe observarse. La primera que el valor a las 3 horas de tratamiento se aparta de esta tendencia, lo que impacta en el coeficiente de determinación, y lo hace muy bajo. La segunda es la elevada dispersión que presentan estos valores a cada tiempo, lo que indica que, este parámetro no es muy confiable para indicar si realmente existe una cinética de degradación.

**Tabla 10**  
*Análisis de varianza para el parámetro “Strength”*

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F <sub>0</sub>	p
Tratamiento	149,67	10	14,967	4,99	0,001*
Error	65,94	22	2,997		
Total	215,60	32			

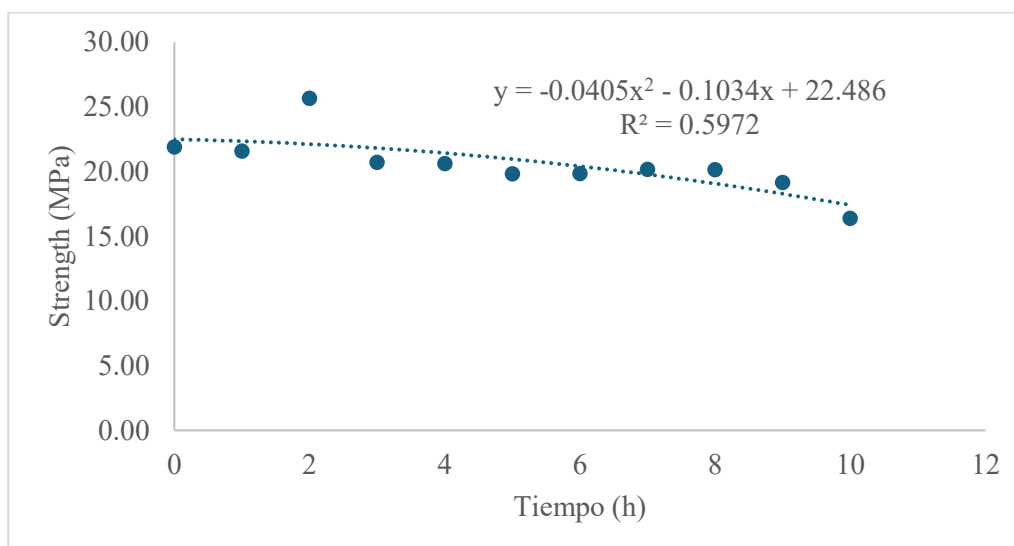
*Nota: Significancia a  $\alpha = 0.05$ ,  $R^2 = 69.42\%$*

**Figura 14**  
Boxplot del parámetro “Strength”



La Figura 15 muestra el modelo matemático de un polinomio cuadrático con los datos obtenidos de “Strength”. Este modelo al compararse con otros tuvo mayor  $R^2$ , mas no es suficiente para considerarlo como el modelo que explica la cinética de este parámetro durante el tratamiento de PEBD con aceite esencial de eucalipto.

**Figura 15**  
Cinética del parámetro “Strength”



La Tabla 11, presenta el análisis de varianza del parámetro “Breaking strain”, resultó significativo ( $p < 0,05$ ), por ello, se realizó una Prueba de Tukey para identificar las diferencias significativas entre los tratamientos. El alto valor del coeficiente determinación permite afirmar

que hay una correlación fuerte entre esta variable y el tiempo de tratamiento, esto se presenta en la siguiente Figura.

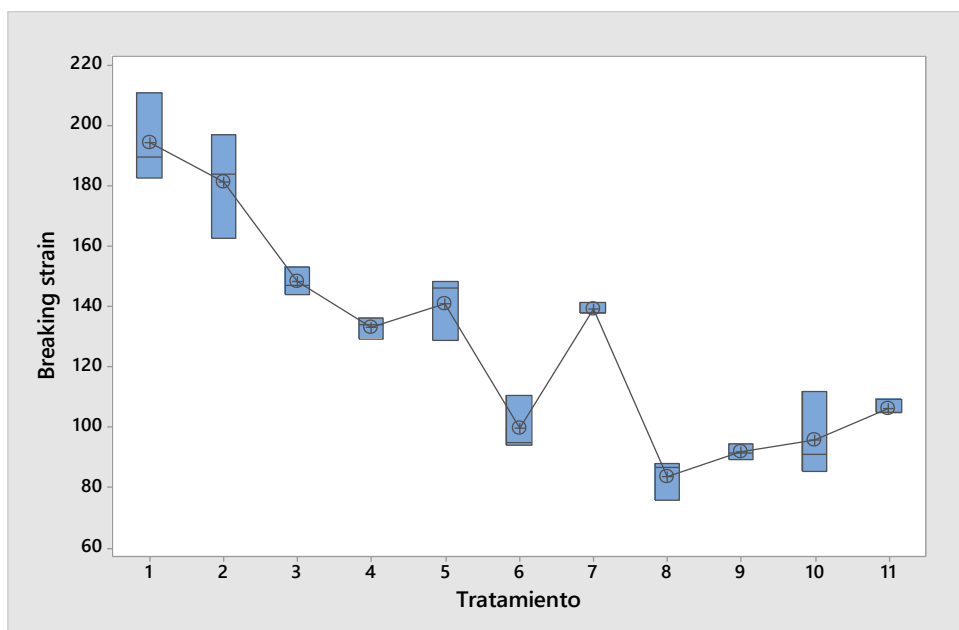
**Tabla 11**  
*Análisis de varianza para el parámetro “Breaking strain”*

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F <sub>0</sub>	p
Tratamiento	40365	10	4036,5	44,21	0,000*
Error	2008	22	91,30		
Total	42373	32			

*Nota: Significancia a  $\alpha = 0.05$ ,  $R^2 = 95.26\%$*

El gráfico de cajas (Boxplot) del parámetro “Breaking strain” (Figura 16), refleja gráficamente una proporcionalidad inversa de este parámetro con el tiempo de tratamiento, a pesar de que se observa cierta dispersión de datos a 1, 2, 5, 8 y 10 horas de tratamiento; así como una desviación en la medida a 7 horas.

**Figura 16**  
*Boxplot del parámetro “Breaking strain”*



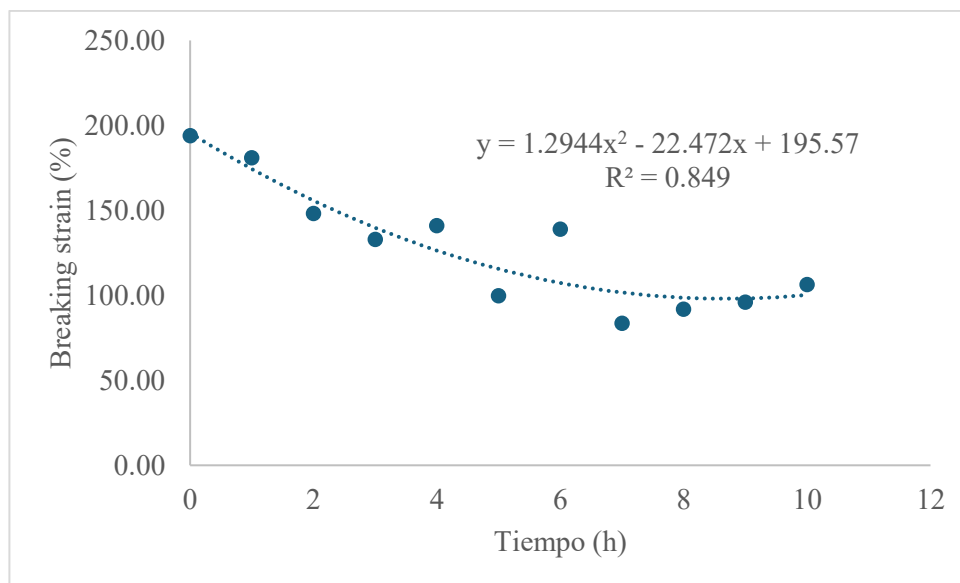
Como consecuencia del análisis de datos y gráfico, se buscó un modelo que pueda explicar la cinética del parámetro “Breaking strain”, hallándose como el mejor el modelo polinómico cuadrático (Figura 17). Este modelo presentó un  $R^2 = 84.9\%$ , es decir que, el tiempo de tratamiento explica el 84.9% de la variación del “Breaking strain”.

En la Tabla 12, se aprecia que, el análisis de varianza del parámetro “Toughness” fue significativo ( $p < 0,05$ ). Por otro lado, se observa un alto coeficiente de determinación lo que permite afirmar que, hay una fuerte relación entre el tiempo de tratamiento y el parámetro en estudio.

El parámetro “Toughness” muestra una fuerte tendencia a disminuir con el tiempo de tratamiento (Figura 18), a pesar de que en el tiempo 2, 3 y 4 hay una alta dispersión de los datos. Esto obliga a buscar un modelo que pueda explicar este comportamiento particular.

Por otro lado, al probar diferentes modelos, el modelo polinómico cuadrático es el que mejor explica la variación de “Toughness” (Figura 19) con el tiempo de tratamiento ( $R^2 = 90.84\%$ ).

**Figura 17**  
*Cinética del parámetro “Breaking strain”*

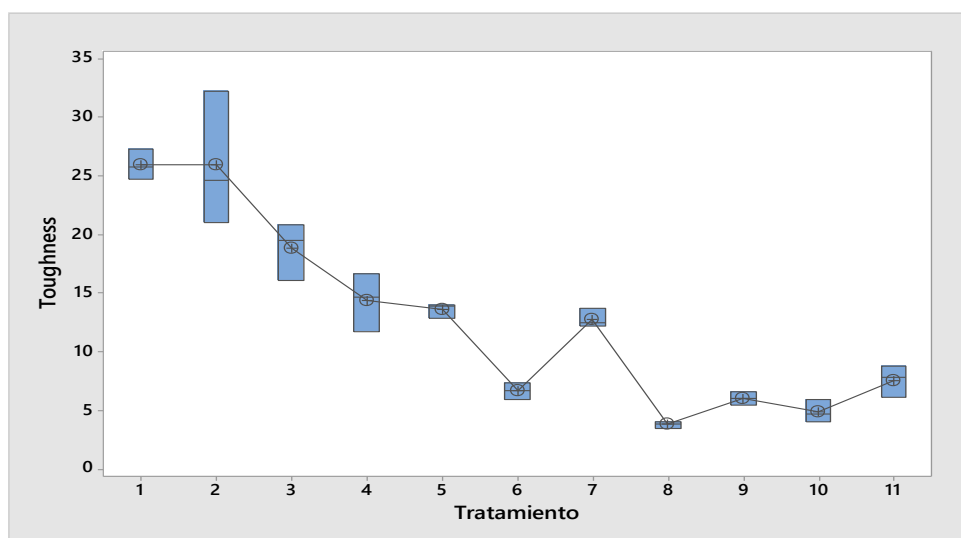


**Tabla 12**  
Análisis de varianza para el parámetro “Toughness”

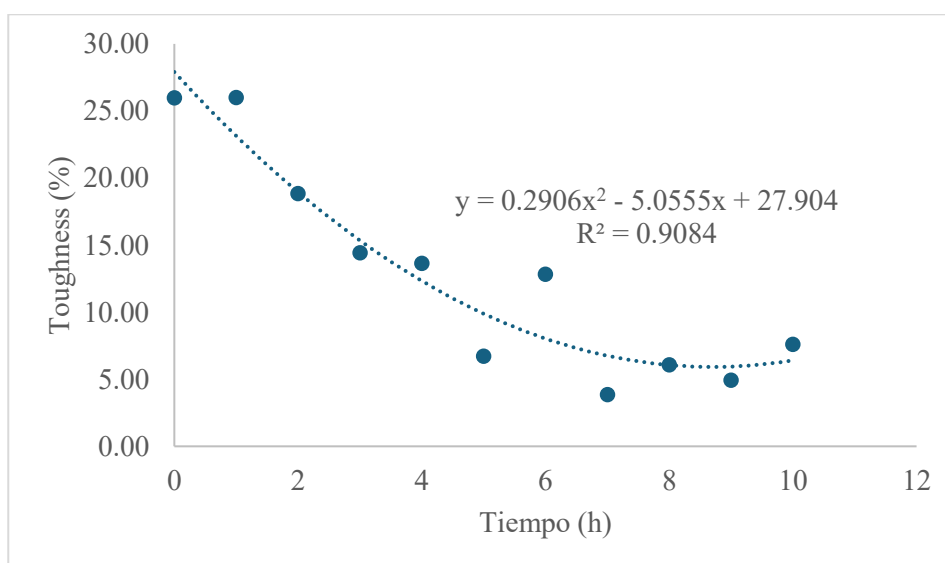
Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F <sub>0</sub>	p
Tratamiento	1917,0	10	191,699	41,29	0,000*
Error	102,2	22	4,643		
Total	2019,1	32			

Nota: Significancia a  $\alpha = 0.05$ ,  $R^2 = 94.94\%$

**Figura 18**  
Boxplot del parámetro “Toughness”



**Figura 19**  
Cinética del parámetro “Toughness”



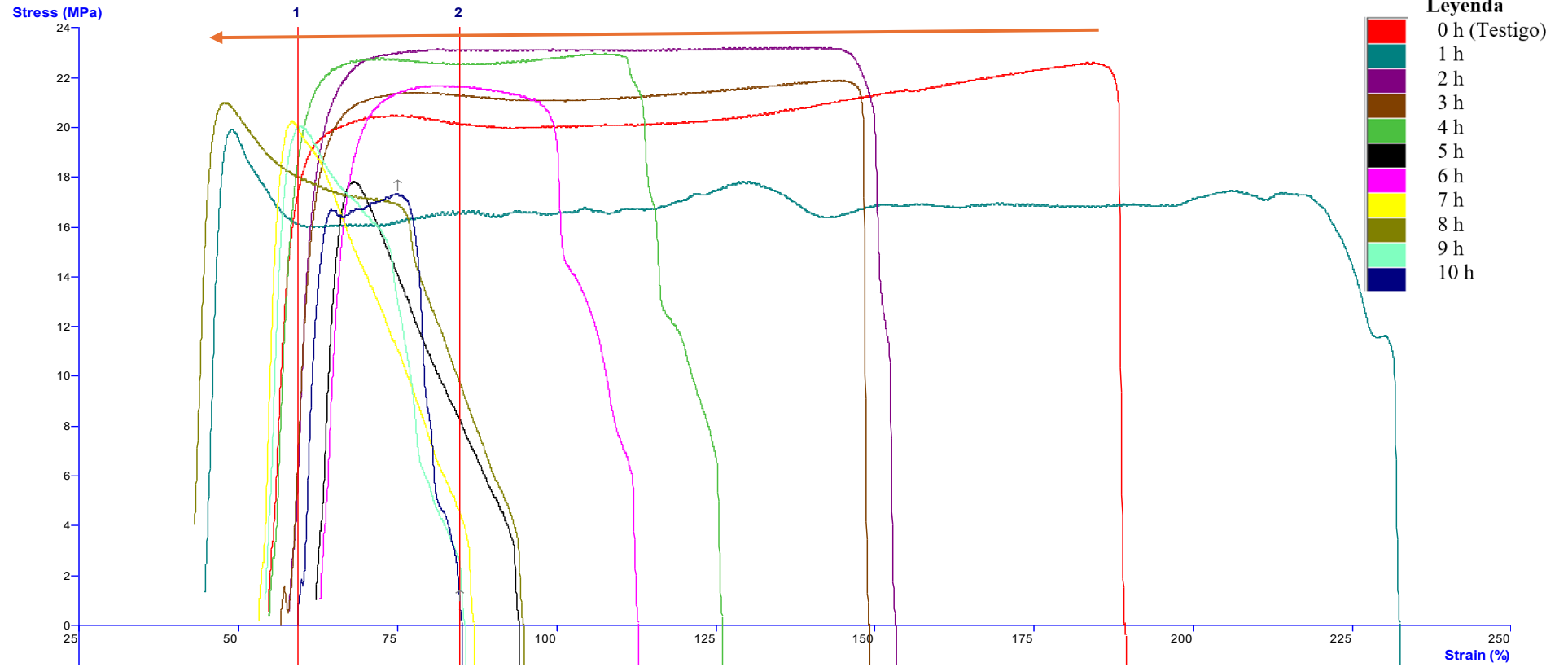
La Figura 20 es expedida por equipo de medida dentro de su informe, y a continuación se proporciona el análisis que resulta de la observación. Para entrar en contexto es preciso señalar que en el eje de las abscisas se encuentra la deformación (%) y en el eje de las ordenadas el esfuerzo (MPa). En todos los tratamientos se observa una línea que llega un pico y luego se curva, esa línea es la línea proporcional de la Ley de Hooke. Luego aparece una curvatura, la cual llega a un punto conocido como límite elástico, que es donde termina la zona de elasticidad. Luego del límite elástico el esfuerzo tiene un comportamiento casi lineal al que se denomina “deformación plástica” y que termina en un punto llamado “punto de fractura”, donde el esfuerzo cae a cero.

Por otro lado, con respecto al esfuerzo se observa un grupo con que requiere un esfuerzo mayor ( $> 22$  MPa) conformado por: 2 h y 4 h; otro grupo que requiere un esfuerzo intermedio (18 a 22 MPa) conformado por: Testigo, 1 h, 3 h, 6 h, 7 h, 8 h y 9 h; y otro grupo que requiere un esfuerzo menor ( $<18$  MPa) conformado por: 5 h y 10 h. Con respecto a la deformación, se aprecia un grupo que presenta una deformación alta ( $>150$  %) conformado por: Testigo, 1 h y 2 h, otro grupo que muestra una deformación intermedia (100 a 150 %) conformado por: 3 h, 4 h y 6 h; y, finalmente, un grupo que presenta una deformación baja ( $<100\%$ ) conformador por: 5 h, 7 h, 8 h, 9h y 10 h.

Las líneas 1 y 2 por defecto el software del equipo de medición las inserta y no se puede omitir, estas señalan comportamientos atípicos del PEBD, pues se observa que, la elasticidad y la plasticidad son bajas; en otras palabras: sin mucho esfuerzo, el plástico se fractura. La flecha que se incorporó en el gráfico, desplazado de derecha a izquierda, fue para resaltar como el punto de fractura se fue reduciendo, con el tiempo de tratamiento del PEBD con aceite esencial.

Finalmente, es observable que, el tratamiento de PEBD con aceite esencial de eucalipto si tuvo un efecto significativo y negativo, sobre la deformación del material (Strain), así como en el esfuerzo requerido para fracturarlo (Stress).

**Figura 20**  
*Comparación de stress (MPa) a diferentes tiempos*

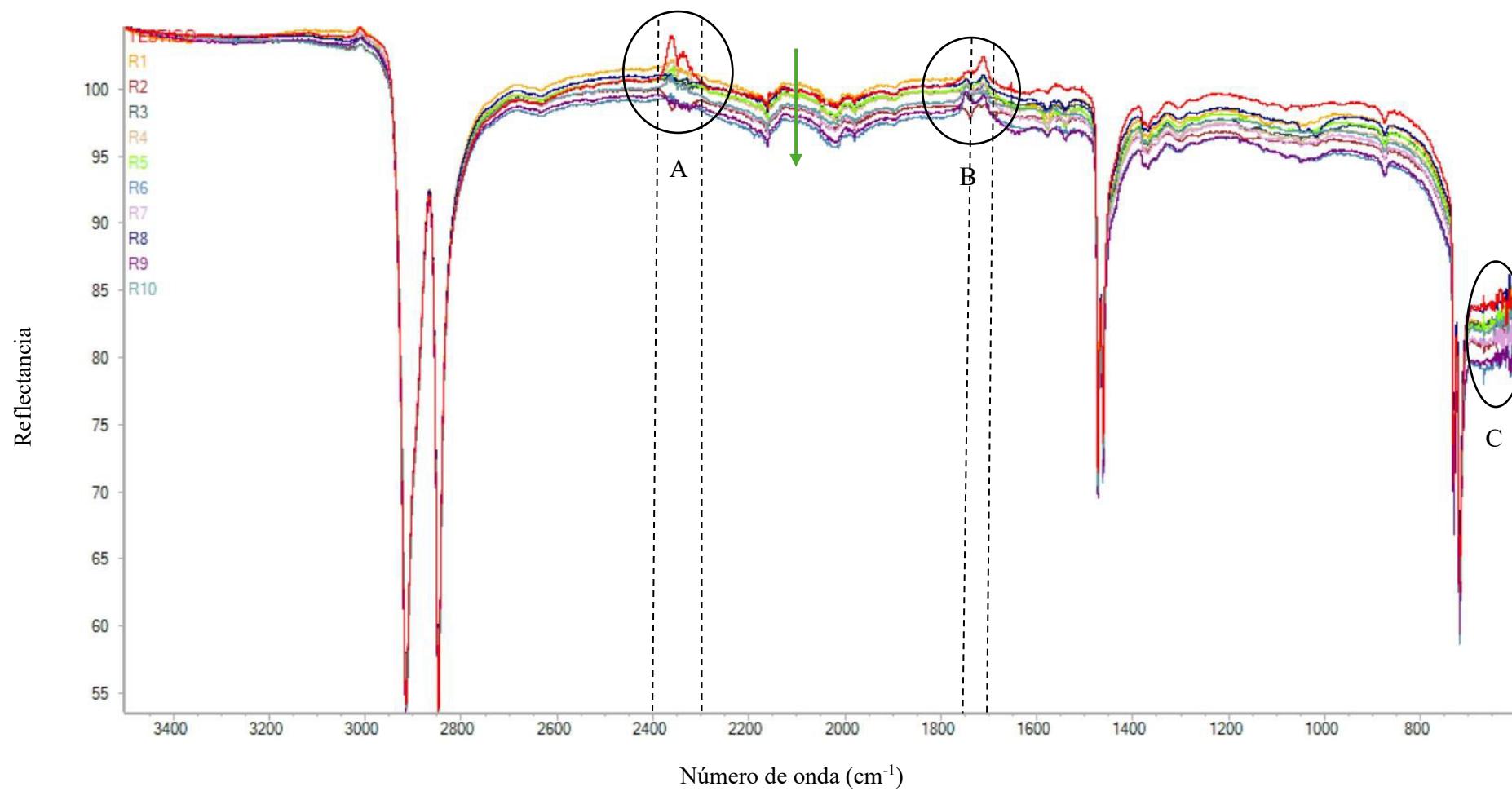


#### 4.5. Espectroscopía FTIR de las muestras de PEBD

La bibliografía refiere que algunos plásticos como el poliestireno cuando fueron tratados con aceite esencial, sufrieron una disolución; y, por lo tanto, una transformación en su composición química (García *et al.*, 2009; Hattori, 2015; Hattori *et al.*, 2008; Thakur *et al.*, 2018). Este trabajo de investigación partió de esta expectativa; sin embargo, no ocurrió este fenómeno de disolución. Es por esta razón, que se tuvo que aplicar una técnica instrumental que permita observar, que pasó con la composición química del PEBD y el aceite esencial de eucalipto después del tratamiento. La técnica de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) es muy útil para caracterizar estos plásticos. En la Figura 21, se muestra la comparación de los espectros FTIR de todos los PEBD sometidos al tratamiento con aceite esencial. En primer lugar, se puede apreciar que, todos los espectros son paralelos, es decir poseen similar reflectancia, salvo en las zonas demarcadas “A”, “B” y “C”; esto puede explicar, por qué no hubo una disolución del polímero PEBD. En segundo lugar, se aprecia que todos los tratamientos, a pesar de tener similar reflectancia, varían en términos de intensidad, es decir se desplazan por debajo del Testigo, excepto el tratamiento 1 h, en especial; esto se atribuye a que el espesor del plástico fue disminuyendo. Esto también explicaría por qué el tratamiento 1 h mostró mayor resistencia a la deformación. Finalmente, las zonas “A” y “B”, muestra las variaciones más resaltantes en la reflectancia de las muestras, es probable que se deba a diferencias entre su grado de ramificación, es decir, el número y tamaño de las ramificaciones, debido al tratamiento. En adición, se puede deber a la pérdida de peso, aunque no significativa, influyó levemente en su composición, de acuerdo con estas zonas “A” y “B”. La zona “C” es la zona llamada “ruido” y que, por lo general, en trabajos posteriores se recomienda ignorar.

**Figura 21**

Comparación de espectros FTIR del PEBD a diferentes tiempos

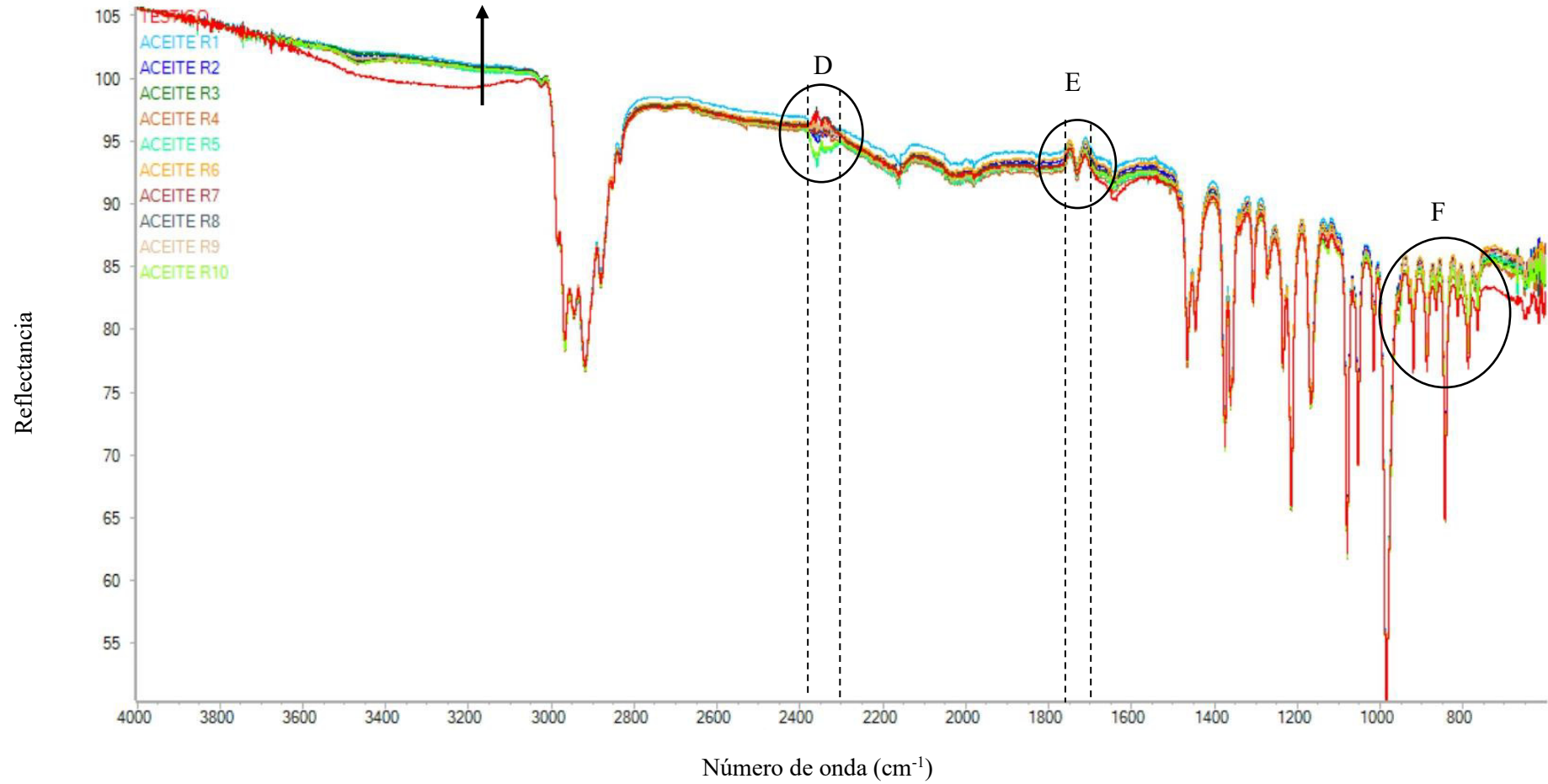


#### 4.6. Espectroscopía FTIR de las muestras de aceite esencial

El aceite esencial de cada tratamiento fue sometido a espectroscopía FTIR y los espectros se pueden observar en la Figura 22. En primer lugar, se puede observar que, en concordancia con los espectros FTIR del PEBD, todos los espectros son paralelos, es decir poseen similar reflectancia, salvo en las zonas demarcadas “D”, “E” y “F”; y en contraposición, se nota que todos los tratamientos, a pesar de tener similar reflectancia, varían en términos de intensidad, es decir se desplazan por arriba del Testigo; esto se atribuye a que cuando el plástico fue disminuyendo de espesor, transfirió parte de su masa al aceite esencial de eucalipto durante el tratamiento. Por otro lado, en las zonas “D” y “E” existe una coincidencia en el número de onda entre los espectros FTIR del PEBD y el aceite esencial, en el rango de 2300 a 2400  $\text{cm}^{-1}$  (Zona A y D) y en el rango de 1700 a 1750  $\text{cm}^{-1}$  (Zona B y E). Esto hace suponer que los grupos químicos que fueron degradados del polietileno se diluyeron y ahora yacen en el aceite esencial. Del mismo modo, que la zona “C”, en el caso del aceite esencial, la zona “F” no debería tomarse en cuenta, por ser ruido.

**Figura 22**

Comparación de espectros FTIR del aceite esencial de eucalipto a diferentes tiempos



## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Algunos de los métodos utilizados para gestionar los residuos plásticos incluyen: vertederos, incineración, reciclaje químico y procesos mecánicos (Hamad *et al.*, 2013; Kan y Demirboğa, 2009; Sasse y Emig, 1998; Thakur *et al.*, 2018), los métodos que incluyen procesos de disolución se encuentran entre los propuestos como los más amigables con el medio ambiente y rentables (Zhao *et al.*, 2018). El proceso de disolución se ve afectado por los tipos de polímeros y solventes (Achilias *et al.*, 2007; Hadi *et al.*, 2014), tamaño del polímero, peso molecular del polímero (Gutiérrez *et al.*, 2013), temperatura de disolución, tiempo de disolución (Achilias *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2013; Hadi *et al.*, 2014) y concentración (Achilias *et al.*, 2009). Termodinámicamente, dos procesos de transporte están involucrados durante la disolución del polímero, la difusión del solvente y el desenredo de la cadena (Miller-Chou y Koenig, 2003). Durante el desenredo de la cadena, la autodifusión del polímero juega un papel importante (Martini *et al.*, 2009).

La extracción de aceite esencial se decidió realizarla a partir de las hojas frescas, porque fue la fuente que mostró mayor rendimiento de extracción, estadísticamente demostrado. Las hojas frescas tienen mayor contenido de humedad que el opérculo y las hojas secas, esto está estrechamente relacionado con el costo y el gasto energético. Moreno *et al.* (2010) señala que, la variable que más influye en el costo es la humedad, debido a que a menor humedad se requiere mayor gasto energético

Respecto a la cinética de degradación del PEBD, se ha encontrado que la variación del peso respecto al tiempo utilizando la mezcla de aceite esencial de eucalipto y etanol u otro disolvente como gasolina de 95 octanos, siguen una cinética de pseudo primer orden, y a su vez la constante de velocidad de reacción depende principalmente del tipo de solvente y la temperatura de operación. Los resultados muestran que a la temperatura de 40 °C se ha

encontrado una mayor velocidad de reacción respecto a la temperatura de 19 °C, siendo sus valores  $0.0073502 \text{ h}^{-1}\text{cm}^{-2}$  y  $0.0062822 \text{ h}^{-1}\text{cm}^{-2}$ , respectivamente. En consecuencia, el modelo matemático del proceso de degradación del eucalipto es el siguiente:

$$-\frac{dm}{dt} = 0.0062822 \text{ h}^{-1}\text{cm}^{-2}A \times m \text{ a } 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$-\frac{dm}{dt} = 0.0073502 \text{ h}^{-1}\text{cm}^{-2}A \times m \text{ a } 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El parámetro “Strength”, se refiere a la resistencia a la tracción y puede relacionarse con la dureza de los productos. Cuanto mayor sea la resistencia a la tracción que posee un producto, más difícil o resistente es estirarlo. Se observó que, a las 3 h, este dato se elevó para luego caer a las 4 h. Este fenómeno, aparentemente inexplicable, se debió a que, cuando se disuelve el PEBD, tempranamente se presenta un aumento en el peso molecular del polímero, la disolución se vuelve controlada por desenredado en lugar de controlada por difusión (Narasimhan y Peppas, 1996), luego esto cambia.

El parámetro “Breaking strain” es alargamiento a la rotura (deformación) y se calcula a partir de la relación entre el cambio en la longitud de la muestra ( $\Delta L$ ) y su longitud original (L) (Jordan *et al.*, 2016). El tratamiento con aceite esencial de eucalipto logró debilitar al PEBD con el paso del tiempo, pues su elongación era menor con el paso del tiempo, se rompía con mayor facilidad y con menor esfuerzo. Poulakis y Papaspyrides (1995) demostraron que al usar tolueno/acetona como solvente/no solvente potencial para el reciclaje de polietileno, los reciclados exhibieron una fuerte retención del índice de fluidez, peso molecular, cristalinidad, desempeño mecánico y tamaño de grano. Al contrario, en el presente trabajo, el PEBD reciclado exhibió menor índice de fluidez y desempeño mecánico.

El parámetro “Toughness” es en esencia, la capacidad de un material para absorber energía durante la deformación hasta la fractura (Callister y Rethwisch, 2018). La pérdida de tenacidad

tuvo un alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 90.84\%$ ) para el modelo polinómico cuadrático (Figura 19). Además, se confirma como el punto de rotura se desplaza hacia la izquierda conforme pasa el tiempo de tratamiento con aceite esencial. Para películas independientes relativamente gruesas, la tenacidad a la fractura se puede medir directamente utilizando el método de tracción de acuerdo con la norma ASTM E-399 (Zhang *et al.*, 2005).

Las propiedades físicas del polietileno dependen, en primer lugar, de los constituyentes químicos y la configuración de las macromoléculas y también de las relaciones entre las cadenas (morfología) que definen los parámetros como la cristalinidad y la segregación de fases (Valadez-Gonzalez *et al.*, 1999). La espectroscopia FTIR es quizás la más utilizada debido a su versatilidad para determinar la composición, conformación, cristalinidad, entre otras (Noda *et al.*, 1999). El espectro FTIR del PEBD y del aceite esencial de eucalipto mostraron una coincidencia en la banda de 1700 a 1750  $\text{cm}^{-1}$ , donde se encuentra el carbonilo acetato de amilo (Balik y Simendinger III, 1998). Los aceites esenciales se consideran una fuente eficaz de antioxidantes de origen natural (Lal, 2018), por lo tanto, donan iones como el hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) o el hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), por otro lado, la capacidad de interacción como aceptor del amilacetato es mayor que el anisol y la anilina (Krishnamurthi y Balamuralikrishnan, 2010). Es por esta razón, que la interacción del PEBD y el aceite esencial, fue más pronunciada a este rango de número de onda, y del mismo modo en el rango de 2300 a 2400  $\text{cm}^{-1}$ , en otros compuestos no reconocidos.

Como se comentó anteriormente, la integridad aparente del PEBD se mantuvo por mucho tiempo (desde junio hasta la fecha de redacción de este trabajo), de acuerdo con el proceso de formación de capas superficiales descrito por Ueberreiter (1968), los solventes acarrear el polímero hinchado hacia el solvente, y una infiltración más elevada del solvente en el polímero, incrementa la capa superficial hinchada hasta que se alcanza un estado de cuasi-estabilidad. Cinéticamente, la disolución del PEBD depende del tamaño del PEBD y del volumen libre de

la fase de gel (Wang *et al.*, 2021). Los tiempos de disolución se reducen al disminuir el tamaño de las partículas y el aumento de la difusividad de los polímeros, debido a la mayor tasa de transferencia de masa (Miller-Chou y Koenig, 2003). De hecho, los mecanismos de disolución de polímeros son muy complejos. Por lo tanto, los fenómenos de disolución se resumen en términos cualitativos. Además, en la tabla 13 se observa que la cantidad de velocidad de reacción se presenta en la temperatura; no obstante, el orden de reacción permanece constante.

**Tabla 13**

*Parámetros cinéticos de la degradación del PET con gasolina*

Parámetros	n	$K(h^{-1}cm^{-2})$
<b>Temperatura</b>		
19 °C	1	0.007208
40 °C	1	0.0085832

También, en la tabla 14 se observa que a mayor temperatura la constante de velocidad de degradación es mayor, lo que implica una mayor tasa de corrosión del PET en presencia de la solución de aceite esencial en alcohol.

**Tabla 14**

*Parámetros cinéticos de la degradación del PET con aceite esencial de eucalipto al 10% de etanol.*

Parámetros	n	$K(h^{-1}cm^{-2})$
<b>Temperatura</b>		
19 °C	1	0.00622822
40 °C	1	0.0073502

Sin embargo, al comparar los resultados de las tablas 13 y 14, se observa que la gasolina tiene mayor reactividad química respecto al aceite esencial de eucalipto, pudiendo atribuirse este hecho a la estructura química tanto de la gasolina como del plástico, que en esencia son hidrocarburos a diferencia del aceite esencial de eucalipto que es una sustancia heterocíclica que no corresponde a la de un hidrocarburo.

## VI. CONCLUSIONES

- La degradación del PEBD obedece a una cinética de primer orden cuya pérdida de peso depende del área de transferencia de masa entre el AEEG y el PEBD, de la temperatura y del tiempo de exposición
- Se ha observado que la temperatura no tiene influencia en el valor del orden de reacción, sin embargo, influye en el valor numérico de la constante, es decir, a mayor temperatura es mayor el valor de la constante lo que indica que la velocidad de degradación es mayor.
- El tiempo de exposición tiene influencia directa en la cantidad de PEBD disuelta en el aceite esencial y es proporcional al área de contacto, propicia además el deterioro de las propiedades mecánicas.
- La degradación química del PEBD tiene influencia en las propiedades mecánicas y corresponde a un modelo cuadrático

## VII. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios conducentes a encontrar la relación más apropiada de aceite esencial de eucalipto y etanol, dado que, un porcentaje alto de eucalipto involucra mayores costos y aspectos relacionados a la tasa de corrosión, dado que una mayor concentración de alcohol etílico podría reducir su reactividad al restarle movilidad y contacto con el sustrato.
- Realizar estudios sobre los posibles usos de la solución de PEBD disuelto en una solución de aceite esencial de eucalipto en alcohol etílico, cuyas mezclas con aditivos tienen potenciales aplicaciones industriales.

## VIII. REFERENCIAS

- Achilias, D. S., Antonakou, E. v, Koutsokosta, E., y Lappas, A. A. (2009). Chemical recycling of polymers from waste electric and electronic equipment. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(1), 212–221.
- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., y Antonakou, E. v. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 536–542.
- Balik, C. M., y Simendinger III, W. H. (1998). An attenuated total reflectance cell for analysis of small molecule diffusion in polymer thin films with Fourier-transform infrared spectroscopy. *Polymer*, 39(20), 4723–4728.
- Barrionuevo Castro, Y. M. (2020). *Evaluación de la degradación de plásticos biodegradables y convencionales distribuidos en las principales cadenas de supermercados de la ciudad de Arequipa–2019*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Bartczak, Z., y Kozanecki, M. (2005). Influence of molecular parameters on high-strain deformation of polyethylene in the plane-strain compression. Part I. Stress–strain behavior. *Polymer*, 46(19), 8210–8221.
- Baser, K. H. C., y Buchbauer, G. (2009). *Handbook of essential oils: science, technology, and applications*. CRC press.
- Breitmaier, E. (2006). *Terpenes: flavors, fragrances, pharmaca, pheromones*. John Wiley y Sons.
- Brown, E. N., Willms, R. B., Gray, G. T., Rae, P. J., Cady, C. M., Vecchio, K. S., Flowers, J., y Martinez, M. Y. (2007). Influence of molecular conformation on the constitutive

- response of polyethylene: a comparison of HDPE, UHMWPE, and PEX. *Experimental Mechanics*, 47(3), 381–393.
- Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 9). Wiley New York.
- García, M., Duque, G., Gracia, I., de Lucas, A., y Rodríguez, J. F. (2009). Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11(1), 2–5.
- Garforth, A. A., Ali, S., Hernández-Martínez, J., y Akah, A. (2004). Feedstock recycling of polymer wastes. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(6), 419–425.
- Gertsakis, J., y Lewis, H. (2003). Sustainability and the waste management hierarchy. Retrieved on January, 30, 2008.
- Gil-Jasso, N. D., Segura-González, M. A., Soriano-Giles, G., Neri-Hipolito, J., López, N., Mas-Hernández, E., Barrera-Díaz, C. E., Varela-Guerrero, V., y Ballesteros-Rivas, M. F. (2019). Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils. *Fuel*, 239, 611–616.
- Green, C. C. (1991). Manufacturing and Biotechnology Synergisms for the Early 2000's. In *Biotechnology: Bridging Research and Applications* (pp. 15–42). Springer.
- Gutiérrez, C., García, M. T., Gracia, I., de Lucas, A., y Rodríguez, J. F. (2013). The selective dissolution technique as initial step for polystyrene recycling. *Waste and Biomass Valorization*, 4(1), 29–36.
- Gutiérrez, C., Rodríguez, J. F., Gracia, I., De Lucas, A., y García, M. T. (2014). Preparation and characterization of polystyrene foams from limonene solutions. *The Journal of Supercritical Fluids*, 88, 92–104.

- Gutiérrez Pulido, H., y de la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2nd ed.). Mc Graw Hill - Interamericana.
- Hadi, J. A., Najmuldeen, F. G., y Ahmed, I. (2014). Quality restoration of waste polyolefin plastic material through the dissolution-precipitation technique. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 20(2), 163–170.
- Hamad, K., Kaseem, M., y Deri, F. (2013). Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2801–2812.
- Hattori, K. (2015). Recycling of expanded polystyrene using natural solvents. *Recycling Materials Based on Environmentally Friendly Techniques*.
- Hattori, K., Naito, S., Yamauchi, K., Nakatani, H., Yoshida, T., Saito, S., Aoyama, M., y Miyakoshi, T. (2008). Solubilization of polystyrene into monoterpenes. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 27(1), 35–39.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6th ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Hiss, R., Hobeika, S., Lynn, C., y Strobl, G. (1999). Network stretching, slip processes, and fragmentation of crystallites during uniaxial drawing of polyethylene and related copolymers. A comparative study. *Macromolecules*, 32(13), 4390–4403.
- Hobeika, S., Men, Y., y Strobl, G. (2000). Temperature and strain rate independence of critical strains in polyethylene and poly (ethylene-co-vinyl acetate). *Macromolecules*, 33(5), 1827–1833.
- Hong, M., y Chen, E. Y.-X. (2017). Chemically recyclable polymers: a circular economy approach to sustainability. *Green Chemistry*, 19(16), 3692–3706.

- Hospodarova, V., Singovszka, E., y Stevulova, N. (2018). Characterization of cellulosic fibers by FTIR spectroscopy for their further implementation to building materials. *American Journal of Analytical Chemistry*, 9(6), 303–310.
- Jordan, J. L., Casem, D. T., Bradley, J. M., Dwivedi, A. K., Brown, E. N., y Jordan, C. W. (2016). Mechanical properties of low density polyethylene. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2(4), 411–420.
- Kan, A., y Demirboğa, R. (2009). A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), 2994–3000.
- Kaplan, D. L., Mayer, J. M., Greenberger, M., Gross, R., y McCarthy, S. (1994). Degradation methods and degradation kinetics of polymer films. *Polymer Degradation and Stability*, 45(2), 165–172.
- Krishnamurthi, P., y Balamuralikrishnan, S. (2010). FT-IR Spectroscopic Studies of Donor-Acceptor (OH $\cdots$  N and OH $\cdots$  O) Complexes. *Asian Journal of Chemistry*, 22(7), 5144.
- Kroschwitz, J. I. (1989). *Polymers: biomaterials and medical applications*. Wiley-Interscience.
- Lal, M. (2018). Jor Lab L-8 (IC0619026; INGR16020), a lemon grass (*Cymbopogon flexuosus*) germplasm with high herbage yield with high essential oil content. *Indian Journal of Plant Genetic Resources*, 31(1), 117–118.
- Liu, Y., Stein, O., Campbell, J. H., Jiang, L., Petta, N., y Lu, Y. (2017). Three-dimensional printing and deformation behavior of low-density target structures by two-photon

- polymerization. *Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices XIV*, 10354, 250–265.
- Lozada Alarcón, S. I. (2017). *Recuperación del Poliestireno Expandido (EPS) con aceite esencial de naranja, Lima 2017*. Universidad César Vallejo.
- Mangalara, S. C. H., y Varughese, S. (2016). Green recycling approach to obtain nano-and microparticles from expanded polystyrene waste. *ACS Sustainable Chemistry y Engineering*, 4(11), 6095–6100.
- Martini, R. E., Brignole, E. A., y Barbosa, S. E. (2009). Dissolution mechanism of polymers in high pressure–high temperature n-alkanes—Application to blends separation. *Polymer Engineering y Science*, 49(3), 602–612.
- Mercedes, L. J. (2019). *Diseño de una planta piloto agroindustrial para la producción de aceite esencial de eucalipto (Eucalyptus globulus), no convencional, bajo la filosofía “Zero Waste”* [DISS, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <http://200.48.129.167/handle/UNJFSC/3044>
- Miller-Chou, B. A., y Koenig, J. L. (2003). A review of polymer dissolution. *Progress in Polymer Science*, 28(8), 1223–1270.
- Moreno, J., López, G., y Jara, R. S. (2010). Modelación y optimización del proceso de extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*). *Scientia Agropecuaria*, 1(2), 147–154.
- Narasimhan, B., y Peppas, N. A. (1996). On the importance of chain reptation in models of dissolution of glassy polymers. *Macromolecules*, 29(9), 3283–3291.

- Noda, I., Story, G. M., y Marcott, C. (1999). Pressure-induced transitions of polyethylene studied by two-dimensional infrared correlation spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 19(2), 461–465.
- Nolazco Cama, D., Villanueva-Quejia, E., Hatta Sakoda, B., y Tellez Monzon, L. (2020). Extracción y caracterización química del aceite esencial de Eucalipto obtenido por microondas y ultrasonido. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(3), 274–284.
- Ong, H. C., Chen, W.-H., Singh, Y., Gan, Y. Y., Chen, C.-Y., y Show, P. L. (2020). A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. *Energy Conversion and Management*, 209, 112634.
- Petit, T., y Puskar, L. (2018). FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation. *Diamond and Related Materials*, 89, 52–66.
- Poulakis, J. G., y Papaspyrides, C. D. (1995). The dissolution/reprecipitation technique applied on high-density polyethylene: I. Model recycling experiments. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 14(3), 237–242.
- Rosen, M. A. (2018). Environmental sustainability tools in the biofuel industry. *Biofuel Research Journal*, 5(1), 751–752.
- Sasse, F., y Emig, G. (1998). Chemical recycling of polymer materials. *Chemical Engineering y Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 21(10), 777–789.
- Schrauwen, B. A. G., Janssen, R. P. M., Govaert, L. E., y Meijer, H. E. H. (2004). Intrinsic deformation behavior of semicrystalline polymers. *Macromolecules*, 37(16), 6069–6078.
- Stashenko, E. E. (2009). *Aceites esenciales*. Universidad Industrial de Santander.

- Thakur, S., Verma, A., Sharma, B., Chaudhary, J., Tamulevicius, S., y Thakur, V. K. (2018). Recent developments in recycling of polystyrene based plastics. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 32–38.
- Tisserand, R., y Young, R. (2013). *Essential oil safety-e-book: A guide for health care professionals*. Elsevier Health Sciences.
- Ueberreiter, K. (1968). Diffusion in Polymers. In *The solution process* (pp. 219–257). Academic Press.
- Uribe, D., Giraldo, D., Gutiérrez, S., & Merino, F. (2010). Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima, Perú. *Revista peruana de biología*, 17(1), 133-136.
- Valadez-Gonzalez, A., Cervantes-Uc, J. M., y Veleza, L. (1999). Mineral filler influence on the photo-oxidation of high density polyethylene: I. Accelerated UV chamber exposure test. *Polymer Degradation and Stability*, 63(2), 253–260.
- Vasile, C., y Pascu, M. (2005). *Practical guide to polyethylene*. iSmithers Rapra Publishing.
- Wang, H., Apostolidis, P., Zhu, J., Liu, X., Skarpas, A., y Erkens, S. (2021). The role of thermodynamics and kinetics in rubber-bitumen systems: a theoretical overview. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(14), 1785–1800.
- Wilbon, P. A., Chu, F., y Tang, C. (2013). Progress in renewable polymers from natural terpenes, terpenoids, and rosin. *Macromolecular Rapid Communications*, 34(1), 8–37.
- Wu, C., Nahil, M. A., Miskolczi, N., Huang, J., y Williams, P. T. (2014). Processing real-world waste plastics by pyrolysis-reforming for hydrogen and high-value carbon nanotubes. *Environmental Science y Technology*, 48(1), 819–826.

- Xiu, Z., Zhu, X., Zhang, D., Yin, J., Wang, D., y An, L. (2003). A new way for chemical degradation of plastic by natural volatile constituents of *Ledum palustre*. *Chinese Science Bulletin*, 48(16), 1718–1721.
- Zhang, G., y Coello-Cedeño, D. (2019). Una nueva forma de degradación del plástico film por los componentes volátiles naturales de los jabones de Illari. *Boletín de Ciencia*, 48(16), 1718–1722.
- Zhang, S., Sun, D., Fu, Y., y Du, H. (2005). Toughness measurement of thin films: a critical review. *Surface and Coatings Technology*, 198(1–3), 74–84.
- Zhao, Y.-B., Lv, X.-D., y Ni, H.-G. (2018). Solvent-based separation and recycling of waste plastics: A review. *Chemosphere*, 209, 707–720.

## IX. ANEXOS

### Anexo A: Testimonio fotográfico

#### *i)* Equipamiento de extracción de aceite esencial



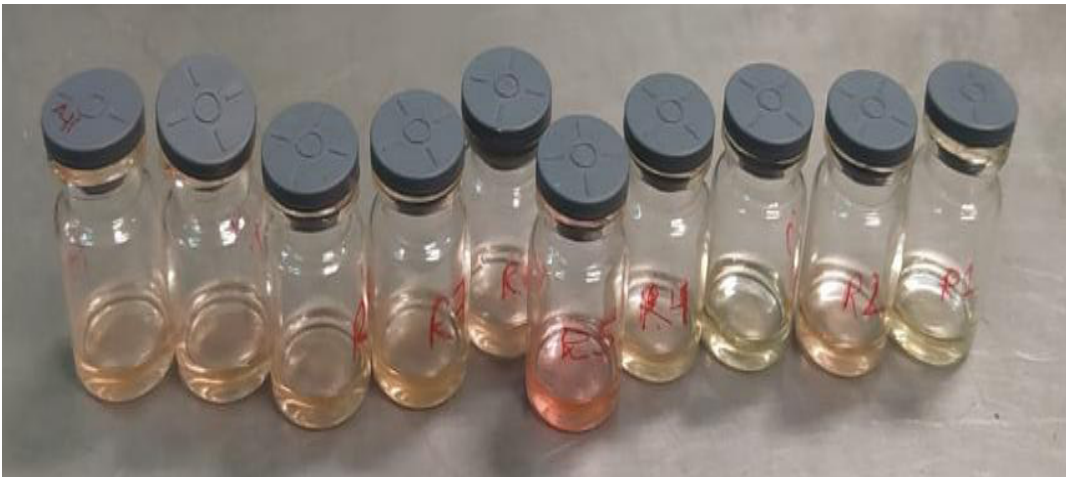
#### *ii)* Materia prima para extracción de aceite esencial



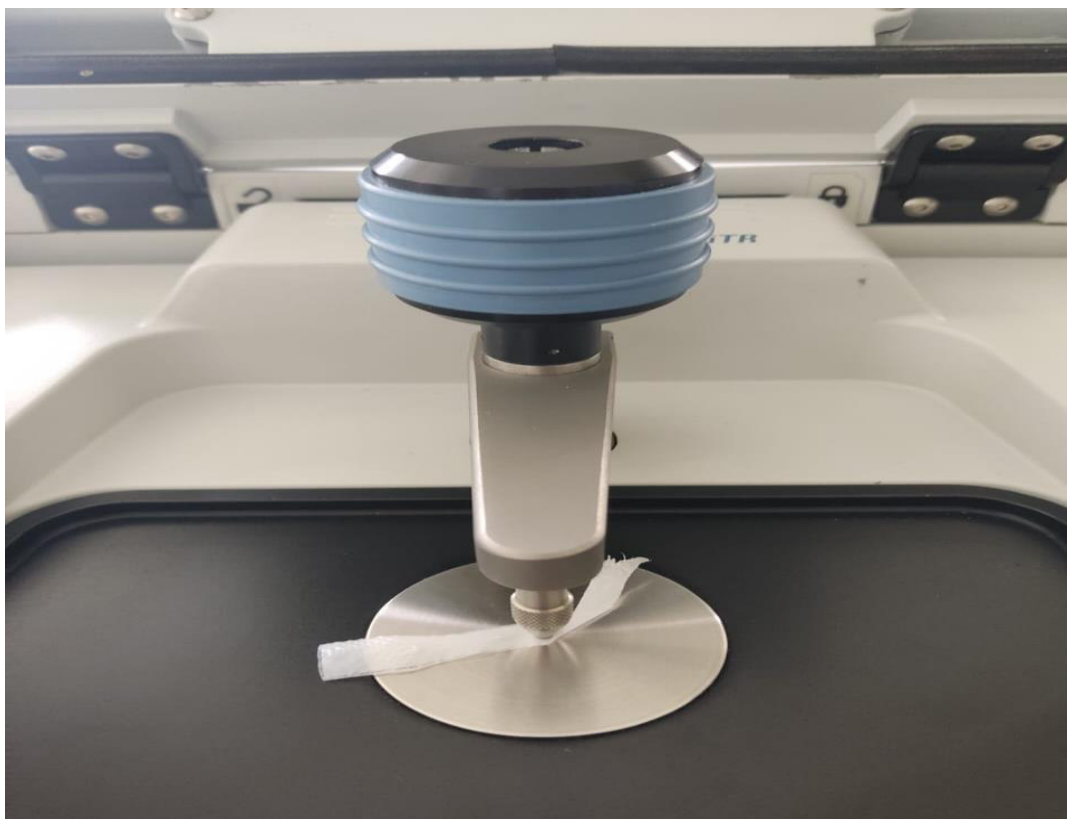
**iii) Preparación de materiales para realización de las muestras**



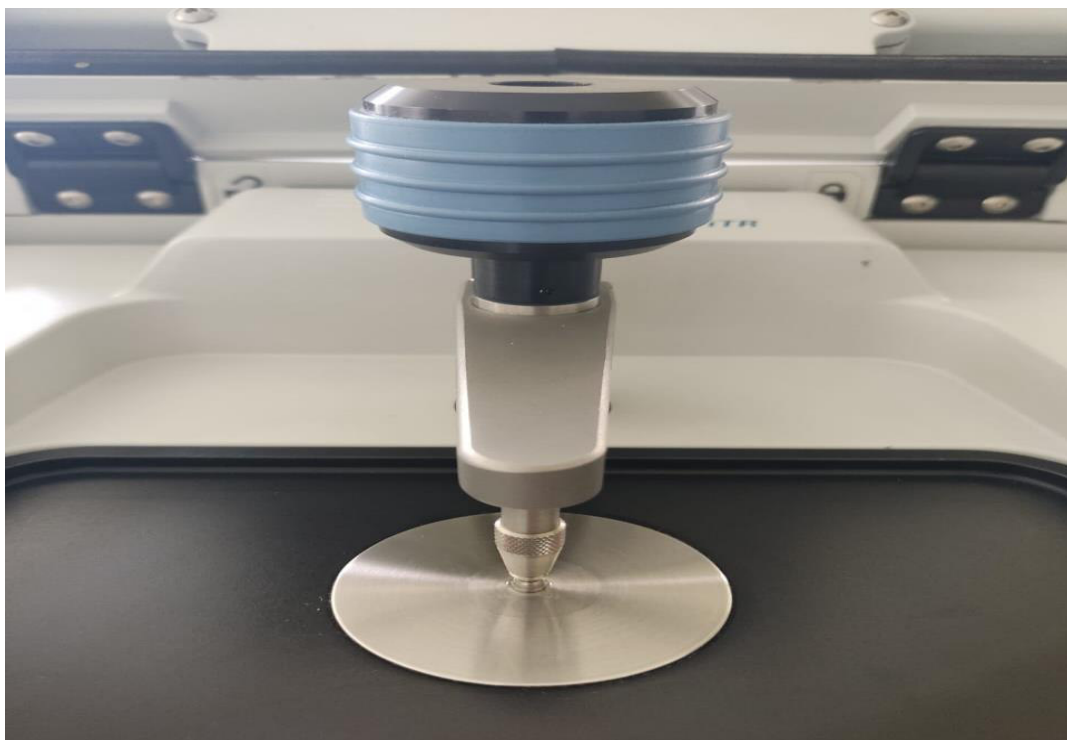
**iv) Muestras de PEBD diluidas en aceite esencial de eucalipto**



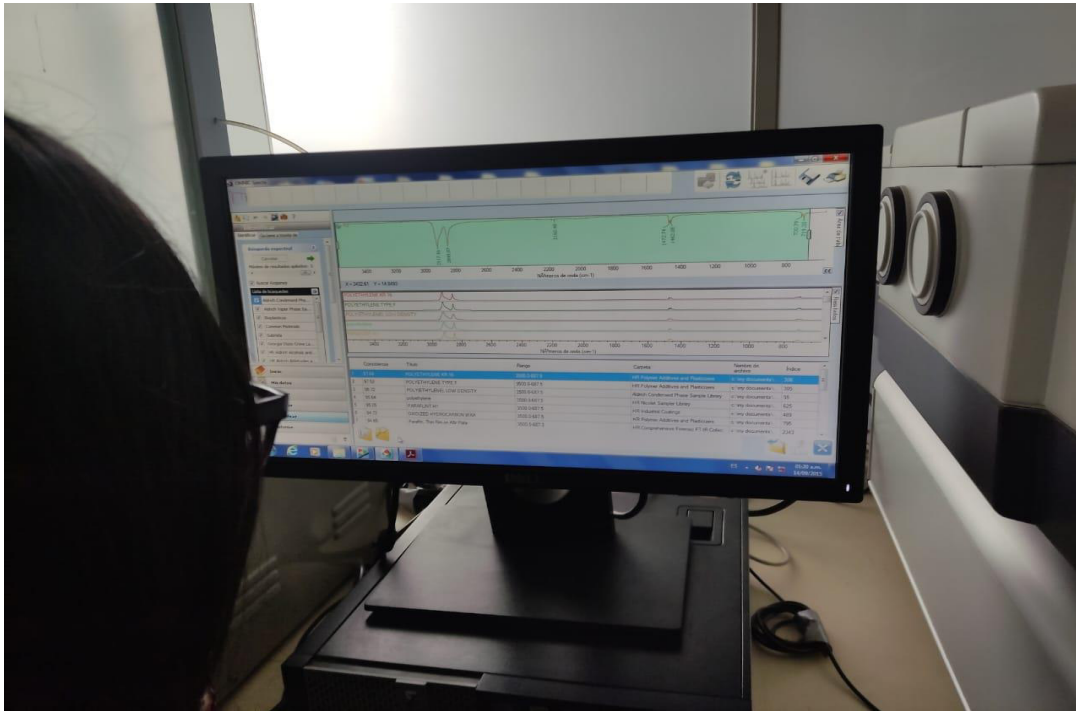
v) Muestras de PEBD evaluadas en el equipo FTIR



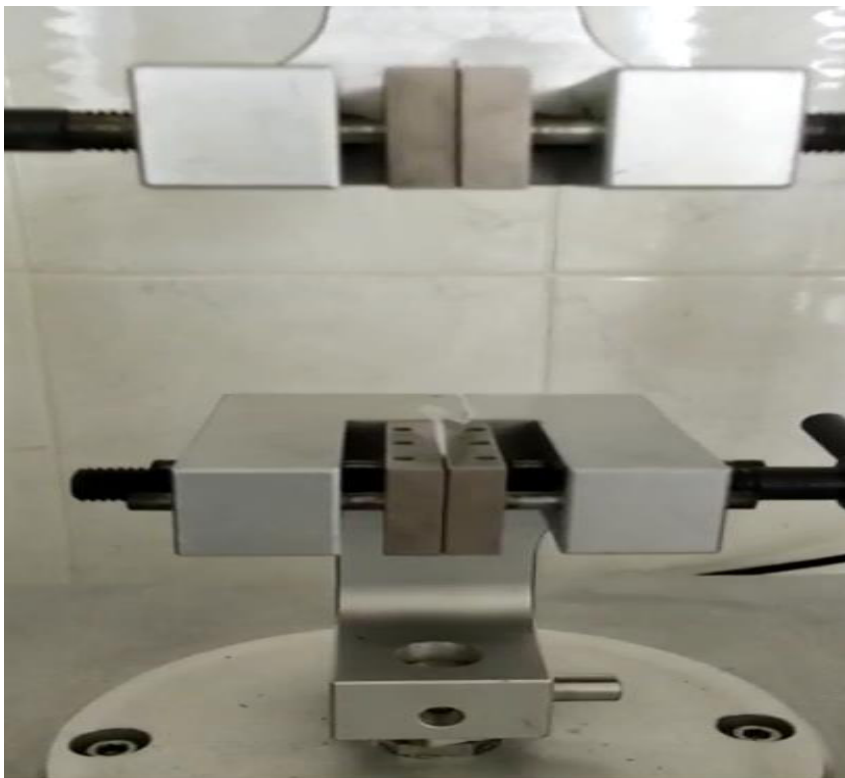
vi) Muestra de aceite esencial de eucalipto evaluadas en el equipo FTIR



**vii) Interfaz de computadora del equipo FTIR**



**viii) Medición de propiedades mecánicas en el equipo TA Analyser**



**Anexo B: Muestras estudiadas**

Tratamiento 1 h



Tratamiento 2 h



Tratamiento 3 h



Tratamiento 4 h



Tratamiento 5 h



Tratamiento 6 h



Tratamiento 7 h



Tratamiento 8 h



Tratamiento 9 h



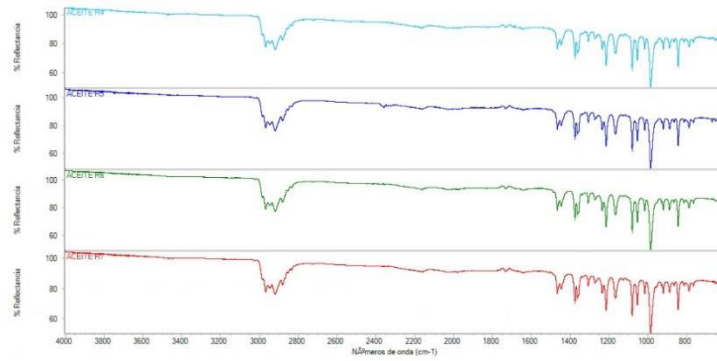
Tratamiento 10 h

## Anexo C: Lecturas FTIR de Aceite esencial

14/09/2015 UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO 12:44 a.m.

### COMPARACIÓN ACEITES

Resultados del espectro

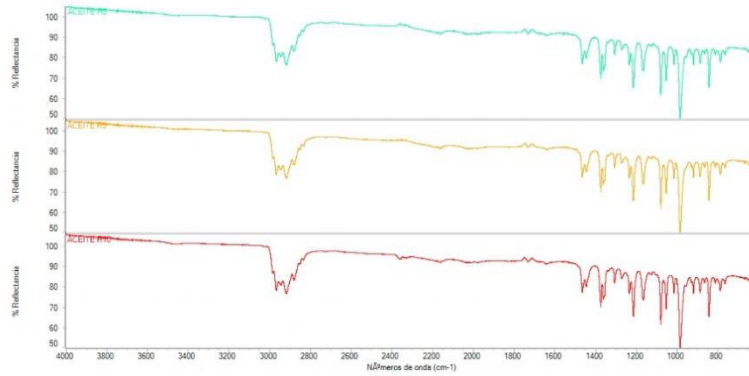


Leído con ATR en Thermo Nicolet ISSO FT-IR

14/09/2015 UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO 12:45 a.m.

### COMPARACIÓN ACEITES

Resultados del espectro

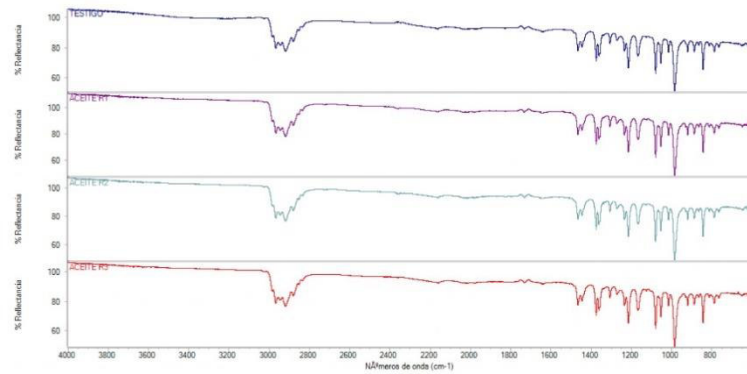


Leído con ATR en Thermo Nicolet ISSO FT-IR

14/09/2015 UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO 12:44 a.m.

### COMPARACIÓN ACEITES

Resultados del espectro



Leído con ATR en Thermo Nicolet ISSO FT-IR

## Anexo D: Lecturas FTIR de residuos de PEBD

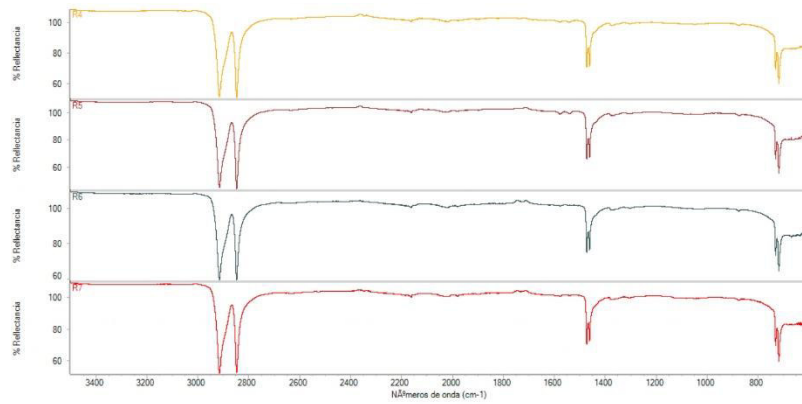
14/09/2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

12:40 a.m.

### COMPARACIÓN SOLIDOS

Resultados del espectro



Leído con ATR en Thermo Nicolet IS50 FT-IR

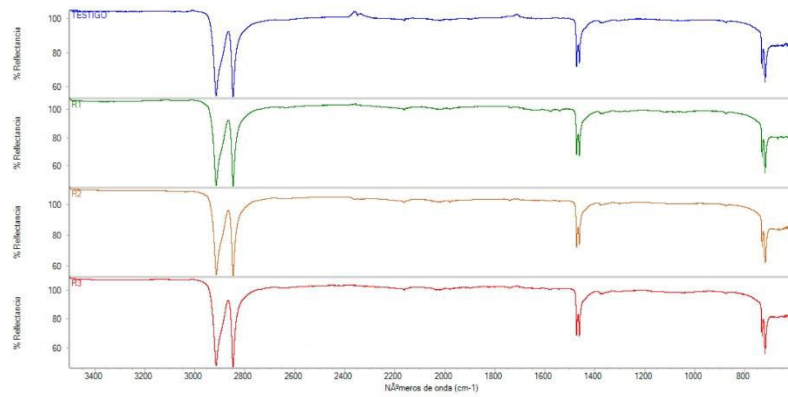
14/09/2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

12:40 a.m.

### COMPARACIÓN SOLIDOS

Resultados del espectro



Leído con ATR en Thermo Nicolet IS50 FT-IR

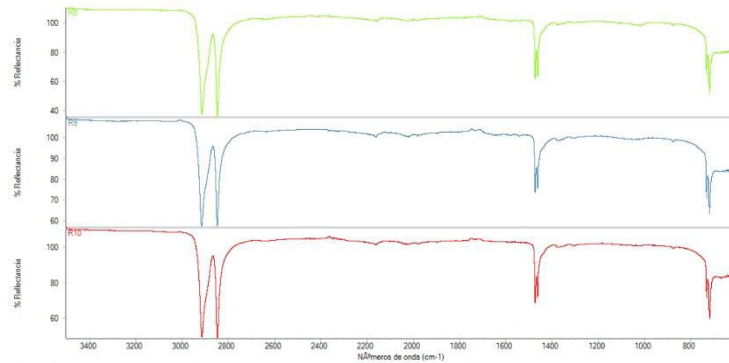
14/09/2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

12:41 a.m.

### COMPARACIÓN SOLIDOS

Resultados del espectro



Leído con ATR en Thermo Nicolet IS50 FT-IR

### Anexo E: Matriz de consistencia

**Título:** “Cinética de degradación química de residuos de polietileno de baja densidad (PEBD) por disolución en aceite esencial de *Eucalyptus globulus*”

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿Cuál será la cinética de degradación química de residuos de polietileno de baja densidad (PEBD) por disolución en aceite esencial de <i>Eucalyptus globulus</i>?</p> <p><b>Problemas específicos</b></p> <p>a) ¿Cómo afecta el tiempo en la tasa de degradación del PEBD?</p> <p>b) ¿Cómo afecta la temperatura en las constantes cinéticas de la Ley de velocidad?</p> <p>c) ¿Cómo afecta la degradación química en las propiedades mecánicas del PEBD?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Determinar la expresión cinética de la degradación química de residuos de polietileno de baja densidad (PEBD) por disolución en aceite esencial de <i>Eucalyptus globulus</i>.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>a) Determinar la influencia del tiempo en la tasa de degradación del PEBD.</p> <p>b) Determinar la influencia de la temperatura en la constante cinética de la Ley de velocidad.</p> <p>c) Determinar el efecto de degradación química en las propiedades mecánicas del PEBD.</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>La cinética de la degradación del PEBD por exposición en aceite esencial de eucalipto es de primer orden.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b></p> <p>a) El tiempo de exposición del PEBD en AEEG tiene un efecto directo en la tasa de disminución del peso del PEBD.</p> <p>b) La temperatura de tratamiento tiene efecto directo en el incremento de la constante de velocidad de corrosión del PEBD en AEEG.</p> <p>c) La degradación química tiene influencia en las propiedades mecánicas del PEBD.</p>	<p><b>Dependiente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinética de degradación</li> </ul> <p><b>Independiente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Propiedades mecánicas</li> </ul>